FUNDAMENTOS DE
FÍSICA
HALLIDAY & RESNICK
9ª Edição
JEARL WALKER
MECÂNICA
VOLUME 1
genio
LTC

EDIÇÃO

FUNDAMENTOS DE

FISICA

Mecânica

•

*

Grupo

Editorial -------------

Nacional

O GEN I Grupo Editorial Nacional reúne as editoras Guanabara Koogan, Santos, Roca,

AC Farmacêutica, Forense, Método, LTC, E..U. e Forense Universitária, que publicam nas

áreas cientica, técnica e proissional.

Essas empresas, respeitadas no mercado editorial, construíram catálogos inigualáveis,

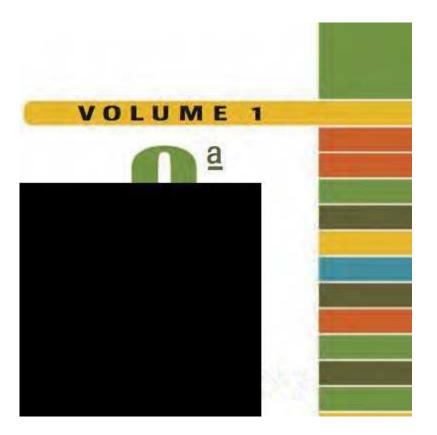
com obras que têm sido decisivas na formação acadêmica e no aperfeiçoamento de

várias gerações de prossionais e de estudantes de Administraão, Direito, Enfermagem, Engenharia, Fisioterapia, Medicina, Odontoloia, Educação Física e muitas outras ciências, tendo se tornado sinônimo de seriedade e respeito.

Nossa missão é prover o melhor conteúdo cientíico e distribuí-lo de maneira leível e

conveniente, a preços justos, gerando beneícios e servindo a autores, docentes, livreiros, funcionários, colaboradores e acionistas.

Nosso comportamento ético incondicional e nossa responsabilidade social e ambiental

são reforçados pela natureza educacional de nossa atividade, sem comprometer o crescimento contínuo e a rentabilidade do grupo.

HALLIDAY & RESNICK

EDIÇÃO

FUNDAMENTOS DE

FISICA

Mecânica

Jearl Walker

Cleveland State University

Tradução e Revisão Técnica

Ronaldo Sério de Biasi, Ph.D.

Professor Titular do Insituto Militar de Engenharia -ME

Apesar dos melhores esforços dos autores, do tradutor, do editor e dos revisores, é inevitável que surjam erros no texto. Assim, são bem-vindas as comunicações de usuários sobre

correções ou sugestões referentes ao conteúdo ou ao nível pedagógio que auxiliem o

aprimoramento de edições futuras. Os comentários dos leitores podem ser encaminhados à

LTC-Livros Técnicos e Cienicos Editora pelo e-mail ltc@grupogen.com.br.

HALLDA Y & RESNICK: FUNDAMENTALS OF PHYSICS, VOLUME ONE, NINTH EDITION

SUMARIO GERAL

Volume 1

Volume 3

1 Medição

21 Cargas Elétricas

2 Movimento Retilíneo

22 Campos Elétricos

3 Vetores

23 Lei de Gauss

4 Movimento em Duas e Três Dimensões

24 Potencial Elétrico

5 Força e Movimento -1

25 Capacitância

6 Força e Movimento -li

26 Corrente e Resistência

7 Energia Cinética e Trabalho

27 Circuitos

8 Energia Potencial e Conservação da Energia

28 Campos Magnéticos

9 Centro de Massa e Momento Linear

29 Campos Magnéticos Produzidos por

10 Rotação

Correntes

11 Rolamento, T arque e Momento Angular

30 Indução e Indutância

31 Oscilações Eletromagnéticas e Corrente

Volume 2

Alternada

12

32 Equações de Mawell; Magnetismo da Matéria

Equilíbrio e Elasticidade

13 Gravitação

14

Volume 4

Fluidos

15

33 Ondas Eletromagnéticas

Oscilações

16

34 lmagens

Ondas-1

17

35 Inteferência

Ondas-li

18

36 Difração

Temperatura, Calor e a Primeira Lei da

Termodinâmica

37 Relatividade

19 A Teoria Cinética dos Gases

38 Fótons e Ondas de Matéria

20 Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica

SUMARIO

Volume 1

4-2 Posição e Deslocamento **61**

4-3 Velocidade Média e Velocidade Instantânea

1 MEDIÇAO

63

1

4-4 Aceleração Média e Aceleração Instantânea **65**

1-1 O que É Física? **1**

4-5 Movimento Balístico **67**

1-2 Medindo Grandezas 1

4-6 Análise do Movimento Balístico **69**

1-3 O Sistema Intenacional de Unidades **2**

4-7 Movimento Circular Uniforme 73

1-4

4-8

Mudança de Unidades

Movimento Relativo em Uma Dimensão **75**

3

1-5 Compr

4-9 Movimento Relativo em Duas Dimensões **77**

imento 3

1-6 Tempo 5

REVISÃO E RESUMO 78 PERGUNTAS 79 PROBLEMAS 80

1-7 Massa 6

REVISÃO E RESUMO

5 FORÇA E MOVIMENTO - 1

8 PROBLEMAS 8

91

2 MOVIMENTO RETILÍNEO 1a

5-1 O que É Física? **91**

5-2 Mecânica Newtoniana **91**

2-1 O que É Física? **13**

5-3 A Primeira Lei de Newton **91**

2-2 Movimento **13**

5-4 Força **92**

2-3 Posição e Deslocamento **13**

5-5 Massa **94**

2-4 Velocidade Média e Velocidade Escalar Média **14**

5-6 A Segunda Lei de Newton **95**

2-5 Velocidade Instantânea e Velocidade Escalar Instantânea **17**

5-7 Algumas Forças Especiais 99

2-6 Aceleração **19**

5-8 A Terceira Lei de Newton **102**

2-7 Aceleração Constante: Um Caso Especial **22**

5-9 Aplicando as Leis de Newton **103**

2-8 Mais sobre Aceleração Constante **25**

2-9 Aceleração em Queda Livre

REVISÃO E RESUMO

26

109 PERGUNTAS **110** PROBLEMAS **112**

2-1 O Integração de Gráficos em Análise de Movimento **27**

6 FORÇA E MOVIMENTO - li 121

REVISÃO E RESUMO **29** PERGUNTAS **30** PROBLEMAS **31**

3 VETORES

6-1 O que É Física? **121**

40

6-2 Atrito **121**

3-1 O que É Física? **40**

6-3 Propriedades do Atrito **124**

3-2 Vetores e Escalares **40**

6-4 Força de Arrasto e Velocidade Teminal **126**

3-3 Soma Geométrica de Vetores **41**

6-5 Movimento Circular Uniforme **129**

3-4 Componentes de Vetores **43**

REVISÃO E RESUMO **133** PERGUNTAS **134** PROBLEMAS **135**

3-5 Vetores Unitários **45**

3-6 Soma de Vetores a partir das Componentes **46**

7 ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO 14s

3-7 Vetores e as Leis da Física **49**

3-8 Multiplicação de Vetores **49**

7-1 O que É Física? **145**

REVISÃO E RESUMO **54** PERGUNTAS **55** PROBLEMAS **56**

7-2 O que É Energia? **145**

7-3 Energia Cinética **146**

4 MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS

7-4 Trabalho **147**

DIMENSOES

7-5 Trabalho e Energia Cinética **147**

s1

7-6 Trabalho Realizado pela Força Gravitacional **151**

4-1 O que É Física? **61**

7-7 Trabalho Realizado por uma Força Elástica **154**

..

SUMÁRIO

7-8 Trabalho Realizado por uma Força Variável Genérica 157

10-5 Relações entre as Variáveis Lineares e Angulares 258

7-9 Potência 160

10-6 Energia Cinética de Rotação 261

REVISÃO E RESUMO 162 PERGUNTAS 163 PROBLEMAS 165

10-7 Cálculo do Momento de Inércia 262

8 ENERGIA POTENCIAL E

10-8 Torque 267

10-9 A Segunda Lei de Newton para Rotações 268

CONSERVAÇÃO DA ENERGIA 112

10-1 O Trabalho e Energia Cinética de Rotação 210

REVISÃO E RESUMO 273 PERGUNTAS 275 PROBLEMAS 276

8-1 O que É Física? 172

8-2 Trabalho e Energia Potencial 173

11 ROLAMENTO, TORQUE E

8-3 Independência da Trajetória para o Trabalho de Forças

Conservativas 174

MOMENTO ANGULAR 28&

8-4 Cálculo da Energia Potencial 176

11-1 O que É Física? 286

8-5 Conservação da Energia Mecânica 179

11-2 O Rolamento como uma Combinação de Translação e Rotação 286

8-6 Interpretação de uma Curva de Energia Potencial 182

11-3 A Energia Cinética de Rolamento

8-7 Trabalho Realizado por uma Força Externa sobre um Sistema

288

186 11-4 As Forças do Rolamento 289

8-8 Conservação da Energia 189

11-5 O Ioiô 292

REVISÃO E RESUMO 192 PERGUNTAS 193 PROBLEMAS 195

11-6 Revisão do Torque 292

9 CENTRO DE MASSA E MOMENTO 11-7 Momento Angular 294

LINEAR

11-8 Segunda Lei de Newton para Rotações 297

201

11-9 O Momento Angular de um Sistema de Partículas 299

11-1 O Momento Angular de um Corpo Rígido Girando em Torno de um

9-1 O que É Física? 201

Eixo Fixo 300

9-2 O Centro de Massa 201

11-11 Conservação do Momento Angular 302

9-3 A Segunda Lei de Newton para um Sistema de Partículas 212

11-12 Precessão de um Giroscópio 306

9-4 Momento Linear 216

9-5 O Momento Linear de um Sistema de Patículas 217

REVISÃO E RESUMO 307 PERGUNTAS 308 PROBLEMAS 309

9-6 Colisão e Impulso 211

9-7 Conservação do Momento Linear 221

APÊNDICES

9-8 Momento e Energia Cinética em Colisões 224

A O Sistema Internacional de Unidades SI) 319

9-9 Colisões lnelásticas em Uma Dimensão 224

B Algumas Constantes Fundamentais da Física 321

9-1 O Colisões Elásticas em Uma Dimensão 221

e Alguns Dados Astronômicos 322

9-11 Colisões em Duas Dimensões 230

D Fatores de Conversão 323

9-12 Sistemas de Massa Variável: Um Foguete 231

E Fórmulas Matemáticas 327

REVISÃO E RESUMO 233 PERGUNTAS 235 PROBLEMAS 236

F Propriedades dos Elementos 330

10 ROTAÇAO

G Tabela Per

249

iódica dos Elementos 333

10-1 O que É Física? 249

RESPOSTAS

10-2 As Variáveis da Rotação 249

dos Testes e das Perguntas e Problemas lmpares 334

10-3 As Grandezas Angulares São Vetores? 254

10-4 Rotação com Aceleração Angular Constante 255

ÍNDICE 38

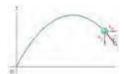
Movimento vertical + Movimento horizontal

Movimento balístico

Velocidade nula

Velocidade constante

Velocidade constante

Velocidade constante

PREFÁCIO

POR QUE ESCREVI ESTE LIVRO

Diversão com um grande desaio. É assim que venho encarando a física desde o dia

em que Sharon, uma das alunas do curso que eu minisrava enquanto doutorando,

me perguntou de repente:

- O que isto tem a ver com a minha vida?

Respondi prontamente:

- Sharon, isto é física! Tem tudo a ver com a sua vida!

A moça me pediu um exemplo. Dei tratos à bola, mas não consegui encontrar nenhum. Nessa noite criei *O Circo Voador da Física* (LTC, 2008) para Sharon, mas também para mim, porque percebi que comparilhava com ela a mesma angústia.

Tinha passado seis anos estudando em dezenas de livros de ísica escritos segundo

elaboradas estratégias pedagógicas e com a melhor das intenções, mas faltava alguma coisa. A física é o assunto mais interessante que existe porque descreve o modo como o mundo funciona, mas não havia nos livros qualquer ligação com a realidade

cotidiana Falava diversão.

Procurei incluir muita física do mundo real neste livro, ligando-o à nova edição

de *O Cico Vodor da Física.* Boa parte dos assuntos vem das minhas aulas, nas

quais posso julgar, pelas expressões e comenários dos alunos, os assuntos e apresenações que funcionam. As observações que regisrei a respeito de meus sucessos e racassos ajudaram a esabelecer as bases para este livro. Minha mensagem aqui é

a mesma que passei a todos os estudantes que enconrei desde o dia em que a Sharon fez aquele comentário:

- Sim, você *pode* usar os conceitos básicos da física para chegar a conclusões

válidas a respeito do mundo real, e é nesse entendimento que está a diversão.

Estabeleci muitos objetivos ao escrever este livro, mas o principal foi proporcionar aos professores um instrumento aravés do qual possam ensinar aos alunos como estudar assuntos científicos, identificar conceitos fundamentais, pensar a respeito de questões cientíicas e resolver problemas quantitativos. Este processo não é fácil, nem para estudantes, nem para professores. Na verdade, o curso associado

a este livro pode ser um dos mais difíceis do currículo acadêmico. Enretanto, pode

ser também um dos mais recompensadores, pois revela os mecanismos fundamentais

do mundo, responsáveis por todas as aplicações científicas

e de engenharia.

e, \'lmw,

Muitos usuários da oitava edição professores e estudantes) enviaram comentários e sugestões para aperfeiçoar Aar, 9 O .,wiw

. ,,> l.i&n'? d: 1,l 'Fil [illegible]

. .. ,

lemos e consideramos cada uma delas.

, .

FERRAMENTAS DE APRENDIZADO

ILUSTRAÇÕES

• Muitas ilusrações deste livro foram modiicadas de modo

!

a ressaltar as ideias principais relacionadas à física.

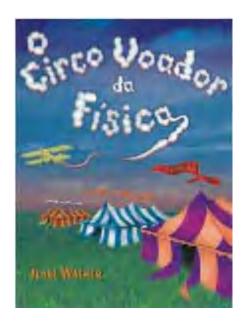
'•

• Pelo menos uma figura em cada capítulo foi ampliada para

,

'

,

que sua mensagem fosse apresentada em etapas.

CIRCO VOADOR DA FÍSICA

• Tópicos de *O Circo Voador da Física* foram introduzidos de várias formas: em

textos de abertura dos capítulos, em exemplos e em problemas. Isso foi feito com

dois objeivos: (1) tomar o assunto mais interessante e diverido; (2) mosrar ao

estudante que o mundo que nos cerca pode sr examinado e compreendido usando

os princípios fundamenais da ísica.

• Os assuntos que também são discutidos em *O Circuito Vodor da Física* estão indicados pelo desenho de um biplano.

A bibliografia do *Circo Voador* (mais

de 11.000 referências a revistas cieníicas e de engenharia) pode ser enconrada

no site http://www.lyingcircusofphysics.com.

Os **EXEMPLOS** foram escolhidos para mostrar que os problemas de ísica devem

ser resolvidos usando o raciocínio, em vez de simplesmente introduzir númros em

uma equação sem nenhuma preocupação com o significado.

As **IDEIAS-CHAVE** dos exemplos mosram ao estudante quais são os conceitos

básicos necessários para resolver um problema. O que queremos dizer com essas

ideias-chave é o seguinte: "Vamos começar a solução usando este conceito básico,

um método que nos prepara para resolver muitos outros problemas. Não começamos sacando do bolso uma equação para uma simples substituição de números, um método que não nos prepara para nada."

O QUE É **FÍSICA?** O corpo de cada capítulo agora começa com esta pergunta e com

a resposta relacionada ao assunto examinado. (Um bombeiro hidráulico uma vez me

perguntou: "Em que você rabalha?" Respondi: "Sou professor de ísica." O bombeiro pensou por alguns instantes e depois me perguntou: "O que é ísica?" Embora a profissão dele dependesse inteiramente dessa ciência, ele não sabia nem mesmo o

que ela significava. Muitos estudantes de ísica básica não sabem deinir essa ciência,

mas supõem que isso é irrelevante para a carreira que escolheram.)

SÍMBOLOS O quadro representado abaixo é repetido no início de cada lista de problemas e mosra os símbolos usados neste livro.

• - - O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em O *Circo Voador da sica* **de Jeart Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.**

GRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram para este visionaram todo o pjeto, do início ao seguintes pessoas pelos comentários e livro. J. Richard Christman, da Acad im, e por Tom Kulesa, que coordenou ideias a respeito da oitava edição: Jomia da Guarda Costeira dos Estados a preparação do site deste livro na Inter nathan Abramson, Portland State Uni

Unidos, mais uma vez criou muitos su net. 1 Aradecemos a Elizabeth Swain, versity; Omar Adawi, Parkland Colleplementos valiosos; suas sugestões para a editora de produção, por juntar as ge; Edward Adelson, The Ohio State este livro foram inestimáveis. Sen-Ben peças durante esse complexo processo. University; Steven R. Baker, Naval Liao do Lawrence Livermore National Agradecemos também a Maddy Lesure Postgraduate School; George Caplan, Laboratory, James Whitenton da Sou pelos pjetos gráficos de capa e miolo; Wellesley College; Richard Kass, Toe then Polytechnic Sate University e a Lee Goldstein, pela editoração de tex Ohio State University; M. R. Khoshbin

Jerry Shi, do Pasadena City College, to, e a Lilian Brady, que se encarregou e-Khoshnazar, Research Instituion for foram responsáveis pela arefa hercúlea da revisão de provas. Hilary Newman Curriculum Development & Educaiode resolver todos os problemas do livro. foi brilhante na pesquisa de fotografias nal Innovations (Teerã); Stuart Loucks, Na John Wiley, a produção do livro foi inusitadas e interessantes. Tanto a edi American River College; Laurence Luacompanhada por Stuart Johnson e Ge tora, John

Wiley & Sons, Inc., como rio, Northem Illinois University; Ponn raldine Osnato, os editores que super-Jearl Walker gostariam de agradecer às Maheswaranathan, Winthrop Universi-1 Colaborou para a dição original em inglês. (N.E.)

ty; Joe McCullough, Cabrillo College; Renate Crawford, *University of*

Peter F. Koehler, *Universiy of*

Don N. Page, University of Albera; Elie

Massachusetts-Dartmouth

Pittsburgh

Riachi, Fort Scott Community College; Mike Crivello, *San Diego State*

Arthur Z. Kovacs, *Rochester Institute*

Andrew G. Rinzler, University of Plori

University

f Technology

da; Dubravka Rupnik, Louisiana State Robert N. Davie, Jr., *St. Petersburg*

Kenneth Krane, *Oregon Sate*

University; Robert Schabinger, Rutgers

Junior College

University

University; Ruth Schwartz, Milwaukee Cheryl K. Dellai, *Glendale*

School ofEngineering; Nora Thonber,

Priscilla Laws, *Dickinson College*

Community College

Rarian V alley Communiy College;

Edbertho Leal, *Polyechnic University*

Frank Wang, LaGuardia Community Eric R. Diez, *Calfornia State*

of Puerto Rico

College; Graham W. Wilson, Universi

University at Chico

Vem Lindberg, *Rochester Institute of*

ty of Kansas; Roland Winkler, Northen N. John DiNardo, *Drexel Universiy*

Technology

Illinois University; Ulrich Zurcher, Cle Eugene Dunnam, *University of*

Peter Loly, *University of Manitoba*

veland State University. Finalmente,

Floria

James MacLaren, *Tuane University*

nossos revisores externos realizaram um Robert Endorf, *University of*

Andreas Mandelis, *University of*

trabalho excepcional e expressamos a

Cincinnati

Toronto

cada um deles nossos agradecimentos. F. Paul Esposito, *University of*

Cincinnati

Robert R. Marchini, *Memphis State*

Maris A. Abolins, *Michigan State*

University

Jerry Finkelstein, *San Jose State*

University

University

Andrea Markelz, *University at*

Edward Adelson, *Ohio State*

Bufalo, SUNY

Robert H. Good, *Calfonia State*

University

University-Hayward

Paul Marquard, *Caspar College*

Nural Akchurin, *Teas Tech*

Michael Gonan, *Universiy of*

David Marx, *Illinois State University*

Yildirim Aktas, *University of North*

Houston

Dan Mazilu, *Washington and Lee*

Carolina-Charlotte

Benjamin Grinstein, *University of*

Universiy

Barbara Andereck, *Ohio Wesleyan*

Calfomia, San Diego

James H. McGuire, *Tulane University*

University

John **B.** Gruber, *San Jose State*

David M. McKinsry, *Eastern*

Tetyana Antimirova, *Ryerson*

University

Washington University

University

n Hanks, *American River College*

Jordon Morelli, *Queen's University*

Mark nett, *Kirkwood Community*

Randy Harris, *University of*

Eugene Mosca, *United States Naval*

College

Calfomia-Davis

Academy

Arun Bansil, *Northeastem University*

Samuel Haris, *Purdue University*

Eric R. Murray, *Georgia Institute of*

Richard Barber, *Santa Clara*

Harold B. Hart, *Western Illinois*

Technology, School of Physics

University

University

James Napolitano, *Rensselaer*

Neil Basecu, *Westchester Community* Rebecca Hartzler, *Seattle Central*

Polytechnic Institute

College

Community College

Blaine Norum, *University of Virgínia*

Anand Bara, *Howard Universiy*

John Hubisz, *North Carolina State*

Michael O'Shea, *Kansas Sate*

Richard Bone, *Florida International*

University

University

University

Joey Huston, *Michigan State*

Patrick Papin, *San Diego State*

Michael E. Browne, *Universiy of*

University

University

Idaho

David Ingram, *Ohio Universiy*

Kiumars Parvin, *San Jose State*

Timothy J. Buns, *Leeward*

Shawn Jackson, *University ofTulsa*

University

Community College

Hector Jimenez, *Universiy of Puerto*

Robert Pelcovis, *Brown University*

Joseph Buschi, *Manhattan College*

Rico

Oren P. Quist, *South Dakota State*

Philip A. Casabella, *Rensselaer*

Sudhakar B. Joshi, *York University*

University

Polytechnic Institute

Leonard M. Kahn, *University of*

Joe Redish, *University of Maryland*

Randall Caton, *Christopher Newport*

Rhode Island

Timothy M. Ritter, *Universiy of*

College

Sudipa Kirley, *Rose-Hulman Institute*

North Carolina at Pembroke

Roger Clapp, *University of South*

Leonard Kleinman, *University of*

Dan Styer, *Oberlin College*

Florida

Txs at Austin

Frank Wang, *LaGuardia Community*

W. R. Conkie, *Queen's Universiy*

Craig Klezing, *University of Iowa*

College

Material

Suplementar

Este livro conta com os seguintes materiais suplementares disponíveis para docentes:

• Simulações

• Soluções dos Problemas (Manual)

• Ilustrações da obra em formato de apresentação

• Testes em PowerPoint

• Ensaios de Jearl Walker

• Aulas em PowerPoint

• Manuais das Calculadoras Gráficas TI-86 & TI-89

• Testes Conceituais

• Testes em Múltipla Escolha

• Respostas dos problemas

• Respostas das perguntas

E os seguintes materiais suplementares de livre acesso:

• Simulações

• Ensaios de Jearl Walker

• Manuais das Calculadoras Gráficas TI-86 & TI-89

• Seleão de Problemas Solucionados

O acesso ao material suplementar é gratuito, bastando que o leitor se cadastre em: http://gen-io.grupogen.com.br

***

. O

GEN-IO (GEN I Informação Online) é o repositório de material suplementar e de serviços relacionados com livros publicados pelo GEN I Grupo Editorial Nacional, o maior conglomerado brasileiro de editoras do ramo científico-técnico-profissional, composto por Guanabara Koogan, Santos, Roca, AC Farmacêutica, Forense, Método, LTC, E.P. U. e Forense Universitária.

C A PÍ T U LO

M E D I _AQ

o U E É FÍSICA?

A ciência e a engenharia se baseiam em medições e comparações. Assim,

precisamos de reras para estabelecer de que forma as grandezas devem ser medidas

e comparadas e de experimentos para estabelecer as unidades para essas medições

e comparações. Um dos propósitos da física (e ambém da engenharia) é projetar e

executar esses experimentos.

Assim, por exemplo, os ísicos se empenham em desenvolver relógios exremamente precisos para que intervalos de tempo possam ser medidos e comparados com exatidão. O leitor pode estar se perguntando se essa exaidão é realmente necessária.

Eis um exemplo de sua imporância: se não houvesse relógios exremamente precisos,

o Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System)*, usado

atualmente no mundo inteiro em uma infinidade de aplicações, não seria possível.

1 -2 Medindo Grandezas

Descobrimos a física aprendendo a medir e comparar grandezas como comprimento,

tempo, massa, temperatura, pressão e corrente elérica.

Medimos cada grandeza física em unidades apropriadas, por comparação com

um **padrão. A uidade** é um nome paricular que atribuímos às medidas dessa grandeza. Assim, por exemplo, o metro (m) é uma unidade da grandeza comprimento.

O padrão corresponde a exaamente 1,0 unidade da grandeza. Como veremos, o padrão de comprimento, que corresponde a exatamente 1,0 m, é a distância percorrida pela luz, no vácuo, durante uma cera fração de um segundo. Em princípio, podemos

deinir uma unidade e seu padrão da forma que quisermos, mas é importante que

cienisas em diferentes partes do mundo concordem que nossas deinições são ao

mesmo tempo razoáveis e práicas.

Depois de escolher um padrão (de comprimento, digamos), precisamos estabelecer procedimentos aravés dos quais qualquer comprimento, seja ele o raio do átomo de hidrogênio, a largura de um skate, ou a disância de uma esrela, possa ser

expresso em termos do padrão. Usar uma régua de comprimento aproximadamente

igual ao padrão pode ser uma forma de executar medidas de comprimento. Enretanto, muitas comparações são necessariamente indiretas. E impossível usar uma régua,

por exemplo, para medir o raio de um átomo ou a distância de uma estrela.

Existem tantas grandezas físicas que não é fácil organizá-las. Felizmente, não

são todas independentes; a velocidade, por exemplo, é a razão enre as grandezas

comprimento e tempo. Assim, o que fazemos é escolher, aravés de um acordo internacional, um pequeno número de grandezas físicas, como comprimento e tempo, e deinir padrões apenas para essas grandezas. Em seguida, deinimos as demais grandezas ísicas em termos dessas *grandezas unamentais* e de seus padrões (conhecidos como *padrões undamentais).* A velocidade, por exemplo, é deinida em termos das

randezas fundamentais comprimento e tempo e seus padrões fundamentais.

Os padrões fundamenais dvem ser acessíveis e ivariáveis. Se deinimos o padrão de comprimento como a distância enre o nariz de uma pessoa e a pona do dedo indicador da mão direita com o braço estendido, temos um padrão acessível, mas

que varia, obviamente, de pessoa para pessoa. A necessidade de precisão na ciência

e engenharia nos força, em primeiro lugar, a buscar a invariabilidade. Só então nos

Tabela 1-1

preocupamos em produzir réplicas dos padrões fundamentais que sejam acessíveis

Unidades de Três Grandezas

a todos que precisem utilizá-los.

Fundamentais do SI

Nome da Smbolo da **1 -3 O Sistema Internacional de Unidades**

Grandeza

Unidade Unidade

Comprimento metro

Em 1971, na 14• Confência Geral de Pesos e Medidas, foram selecionadas como

m

Tempo

segundo

s

fundamentais sete grandezas para constituir a base do Sistema Intenacional de Uni

Massa

quilograma kg

dades (SI), popularmente conhecido como *sistema métrico.* A Tabela 1-1 mostra as

unidades das rês grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo) que serão

usadas nos primeiros capítulos deste livro. Essas unidades foram definidas de modo

a serem da mesma ordem de grandeza que a "escala humana".

Muitas *uniddes derivaas* do SI são definidas em termos dessas unidades fundamentais. Assim, por exemplo, a unidade de potência do SI, chamada de watt W), é deinida em termos das unidades fundamenais de massa, comprimento e tempo.

Como veremos no Capítulo 7,

1 \vatt = 1 \V = 1 kg· m**2**/s3,

(1-1)

onde o último conjunto de símbolos de unidades é lido como quilograma mero quadrado por segundo ao cubo.

Para expressar as randezas muito randes ou muito pequenas requentemente

enconradas na ísica, usamos a *notção cientica*, que emprega potências de 10.

Nessa notação,

3.560.000.000 m = 3,56 x 109 m

(1-2)

e

0,000 000 492 s = 4,92 **X** 10-7 s.

(1-3)

Nos computadores, a notação cientíica às vezes assume uma forma abreviada, como

3.56 E9 e 4.92 E-7, onde E é usado para designar o "expoente de dez". Em algumas calculadoras, a noação é mais abreviada, com o E subsituído por um espaço em branco.

Também por conveniência, quando lidamos com grandezas muito grandes ou

muito pequenas, usamos os prefixos da Tabela 1-2. Como se pode vr, cada prefixo

representa uma certa potência de 10, sendo usado como um fator muliplicativo. Incorporar um prefixo a uma unidade do SI tem o efeito de muliplicar a unidade pelo fator correspondente. Assim, podemos expressar uma certa potência elérica como

1.27 x 109 watts = l,27gigawatt = 1,27 GW

(1-4)

ou um certo intervalo de tempo como

2,35 **X** 10-**9** s = 2,35 nanossegundos = 2,35 ns.

(l-5)

Tabela 1-2

Pref.xos das Unidades do SI

Fator

Prefixo"

Símbolo

Fator

Preixo"

Símbolo

104

iota-

[

10 1

decid

1021

zeta-

z

10-**2**

ccntí-

e

j OIK

cxa—

B

.0-J

1nili—

Ili

[illegible]

1

peta—

p

10-,

1nicro-

μ

1012

tera-

' I'

10-**9**

nano—

n

10**9**

•

g1gl•

G

10-12

pico—

p

10**6**

mcga-

M

10-15

fen1to—

f

1 03

quilo-

Q

10-1x

ato—

a

10**2**

hecto—

h

10-21

zepto—

z

101

deca—

da

10-24

iocto—

1

• Os preixos mais usados aparecem em nerito.

PARTE 1

MEDIÇÃO

3

Alguns preixos, como os usados em mililiro, centímero, quilograma e megabyte,

são provavelmente familiares para o leitor.

1 -4 Mudança de Unidades

Muitas vezes, precisamos mudar as unidades nas quais uma grandeza física está

expressa, o que pode ser feito usando um método conhecido como *conversão em*

cadeia. Nesse método, muliplicamos o valor original por um **fator de conversão**

(uma razão entre unidades que é igual à unidade). Assim, por exemplo, como 1 min

e 60 s correspondem a intervalos de tempo iguais, temos:

l min = 1

60s

e

60s = 1

1 min

Assim, as razões (1 min)/(60 s) e (60 s)/(1 min) podem ser usadas como fatores de

conversão. Note que isso *não é* o mesmo que escrever 1/60 = 1 ou 60 = 1; cada

número e sua *unidde* devem ser ratados conjuntamente.

Como a muliplicação de qualquer grandeza por um fator unitário deixa essa

grandeza inalterada, podemos usar fatores de conversão sempre que isso for conveniente. No método de conversão em cadeia, usamos os fatores de conversão para cancelar unidades indesejáveis. Para converter 2 min em segundos, por exemplo,

temos:

2 1in = (2 min)(l) = (2 **f)(** [illegible])

1

= 120 s.

(1-6)

Se você inroduzir um fator de conversão e as unidades indesejáveis não desaparecerem, inverta o fator e tente novamente. Nas conversões, as unidades obedecem às mesmas reras algébricas que os números e variáveis.

O Apêndice D apresenta fatores de conversão enre unidades de SI e unidades

de outros sistemas, como as que ainda são usadas até hoje nos Estados Unidos. Os

fatores de conversão estão expressos na forma "l min = 60 s" e não como uma razão; cabe ao leitor escrever a razão na forma correa.

1 -5 Comprimento

Em 1792, a recém-criada República da França criou um novo sistema de pesos e

medidas. A base era o mero, defmido como um décimo milionésimo da distância

enre o polo norte e o equador. Mais tarde, por motivos práicos, esse padrão foi

abandonado e o mero passou a ser definido como a disância enre duas linhas inas

gravadas perto das extremidades de uma barra de plaina-irídio, a **barra do metro**

padrão, manida no Bureau Intenacional de Pesos e Medidas, nas vizinhanças de

Paris. Réplicas precisas dessa bara foram enviadas a laboratórios de padronização

em várias partes do mundo. Esses **padrões secundários** foram usados para produzir

outros padrões, mais acessíveis, de tal forma que, no final, todos os insrumentos de

medição de comprimento estavam relacionados à bara do metro padrão por meio

de uma complicada cadeia de comparações.

Com o passar do tempo, um padrão mais preciso que a distância entre duas finas

ranhuras em uma barra de metal se tonou necessário. Em 1960, foi adotado um novo

padrão para o mero, baseado no comprimento de onda da luz. Especiicamente, o

mero foi redeinido como 1.650.763,73 comprimentos de onda de uma certa luz vrmelho-alaranjada emitida por átomos de criptônio 86 (um isótopo do criptônio) em um tubo de descarga de gás. Esse número de comprimentos de onda aparentemente

esranho foi escolhido para que o novo padrão não fosse muito diferente do que era

deinido pela aniga barra do mero padrão.

Em 1983, entretanto, a necessidade de maior precisão havia alcançado tal ponto

que mesmo o padrão do criptônio 86 já não era suiciente e, por isso, foi dado um

passo audacioso: o mero foi redeinido como a distância percorrida pela luz em um

intervalo de tempo especiicado. Nas palavras da 17ª Conferência Geral de Pesos e

Medidas:

O metro é a distância percorrida pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo

de 1/299.792.458 de segundo.

Esse intervalo de tempo foi escolhido para que a velocidade da luz *e* fosse exatamente *e* = 299.792.458 m/s.

Como as medidas da velocidade da luz haviam se tornado exremamente precisas,

fazia senido adotar a velocidade da luz como uma grandeza definida e usá-la para

redefnir o mero.

A Tabela 1-3 mostra uma vasta gama de comprimentos, que vai desde o tamanho do universo conhecido (linha de cima) até o amanho de alguns objetos muito pequenos.

Tabela 1-3

Alguns Comprimentos Aproximados

Descrição

Comprimento em Meros

Distância das galáxias mais antigas

2 X [illegible]

Distância da galáxia de Andrômeda

2 X 10**22**

Distância da estrela mais próxima, Proxima Centauri

4 X t()I<•

Distância de Plutão

6 X 10**12**

Raio da Terra

6 X 106

Altura do Monte Everest

9 X 101

Espessura desta página

1 X 1 0 -**4**

Comprimento de um vrus ípico

1 X 10-K

Raio do átomo de hidrogênio

5 X 10-11

Raio do próton

I X 10-15

Exemplo

Estimativa de ordem de grandeza: novelo de linha

O maior novelo do mundo tem cerca de 2 m de raio. Qual Nesse caso, com área da seção reta ***d2*** e comprimento ***L,*** a é a ordem de grandeza do comprimento *L* do fio que for corda ocupa um volume total de ma o novelo?

V = (área da seção reta)(comprimento) = *d2L.*

IDEIA-CHAVE

Esse valor é aproximadamente igual ao volume do novelo,

Poderíamos, evidentemente, desenrolar o novelo e medir dado por 41rR *3*/3, que é quase igual a4R3, já que T é quase o comprimento *L* do fio, mas isso daria muito rabalho, igual a 3. Assim, temos:

além de deixar o fabricante do novelo muito aborrecido.

*d***2***L* = 4R3,

Em vez disso, como estamos interessados apenas na odem

de grandeza, podemos estimar as randezas necessárias ou

4R *3*

L = -

4(2 m)3

para fazer o cálculo.

d2

(4 < 10 [illegible] m)**2**

= 2 X 10" m = 106 m = 103 kn1.

Cálculos Vamos supor que o novelo seja uma esfera de

(Resposta)

raio ***R*** = 2 m. O io do novelo certamente não está apertado (existem espaços vazios enre trechos viinhos do io). (Note que não é preciso usar uma calculadora para realizar Para levar em conta esses espaços vazios, vamos superesti um cálculo simples como este.) A ordem de grandeza do mar um pouco a área de seção ransversal do io, supondo comprimento do io é, poranto, 1000 km!

que seja quadrada, com lados de comprimento d = 4 mm.

PARTE 1

MEDIÇÃO

5

1 -6 Tempo

O tempo tem dois aspectos. No dia a dia e para alguns fins científicos, queremos

saber a hora do dia para podermos ordenar eventos em sequência. Em muitos trabalhos cieníicos, esamos interessados em conhecer a duração de um evento. Assim, qualquer padrão de tempo deve ser capaz de responder a duas perguntas: *"Qando*

isso aconteceu?" e *"Qanto tempo* isso durou?" A Tabela 1-4 mosra alguns intervalos de tempo.

Tabela 1-4

Alguns Intevalos de Tempo Aproximados

Descrição

Intervalo de Tempo em Segundos

Tempo de vida do próton (teórico)

3 X l0l)

Idade do universo

5 X **10**17

Idade da pirâmide de Quéops

l X **10**11

xpecativa de vida de um ser humano

2 X 109

Duração de um dia

9 X 104

Intervalo entre duas batidas de um coração humano

8 X 10-1

Tempo de vida do múon

2 X **10-**6

Pulso luminoso mais curto obido em laboratório

1 X **10-**16

Tempo de vida da partícula mais instável

1 X **10-.** 1

Tempo de Planck•

1 X **1 0 -**43

"Tempo decorrido após o big bang a partir do qual as leis de física que conhecemos passaram a ser válidas.

Qualquer fenômeno repetiivo pode ser usado como padrão de tempo. A rotação

da Terra, que determina a duração do dia, foi usada para esse im durante séculos;

a Fig. 1-1 mosra um exemplo interessante de relógio baseado nessa rotação. Um

relógio de quartzo, no qual um anel de quartzo é posto em vibração contínua, pode

ser sincronizado com a rotação da Terra por meio de observações astronômicas e

usado para medir intervalos de tempo no laboratório. Enretanto, a calibração não

pode ser realizada com a exatidão exigida pela tecnologia modena da engenharia

e da ciência.

Para atender à necessidade de um melhor padrão de tempo, foram desenvolvidos relógios atômicos. Um relógio atômico do Naional Institute of Standards and Technology (NIST) em Boulder, Colorado, EUA, é o padrão da Hora Coordena

•

da Universal (UTC) nos Estados Unidos. Seus sinais de tempo estão disponíveis

JO I I

através de ondas curtas de rádio (estações WWV e WWVH) e por telefone (303—

499-71 l l). Sinais de tempo (e informações relacionadas) estão também disponíveis no United States Naval Observatory no site http://ycho.usno.navy.mil/time.

html. * (Para acertar um relógio de forma exremamente precisa no local onde você

I

r • 7

.

,

3 •

se encontra, seria necessário levar em conta o tempo necessário para que esses si

·. '

•

nais cheguem até você.)

;

;_'

-

· .,6 ·' , , ' 4

A Fig. 1-2 mostra as variações da duração de um dia na Terra durante um pe

•••• ,

t

. .. [illegible]

• • •••• t• \

ríodo de quaro anos, obidas por comparação com um relóio atômico de césio.

Como a variação mosrada na Fig. 1-2 é sazonal e repetiiva, desconfiamos da rota **Figura 1-1 Quando o sistema mérico** ção da Terra quando existe uma diferença enre a Terra e um átomo como padrões **foi proposto em 1792, a deinição de** de tempo. A variação se deve a efeitos de maré causados pela Lua e pela circulação **hora foi mudada para que o dia tivesse** atmosférica.

10 horas, mas a ideia não pegou. O

Em 1967, a 13ª Conferência Geral de Pesos e Medidas adotou como padrão de **fabricante deste relógio de 10 horas,** tempo um segundo com base no relógio de césio:

prudentemente, incluiu um mostrador

menor que indicava o tempo da forma

convencional. Os dois mostradores

* O Observatório Nacional fonece a hora legal brasileira no site http:/pcdshOl.on.br. N.T.)

indicam a mesma hora? *(Steven Pitkin)*

Diferença entre a duração do dia
e exatamente 24 h (ms)
+2
+3

Figua 1-2 Variações da duração do

.,,

dia em um período de 4 anos. Note que

a escala vertical inteira corresponde a

apenas 3 ms (0,003 s).

+J [illegible]

_

8_

[illegible]

98

[illegible]

[illegible] [illegible]

[illegible]

1

1

1

Um segundo é o intervalo de tempo que corresponde a 9.192.631 .770 oscilações da

luz (de um comprimento de onda especiicado) emitida por um átomo de césio 133.

Os relógios atômicos são tão estáveis que, em princípio, dois relógios de césio teriam

que funcionar por 6000 anos para que a diferença enre as leituras fosse maior que

1 s. Mesmo assim, essa precisão não é nada em comparação com a dos relógios que

estão sendo consruídos atualmente, que pode chegar a 1 parte em 1018, ou seja, 1 s

em 1 X 1018 s (cerca de 3 X 1010 anos).

1 -7 Massa

O Quilograma-Padrão

O padrão de massa do SI é um cilindro de plaina-irídio (Fig. 1-3) mantido no Bureau

Intenacional de Pesos e Medidas, nas proximidades de Paris, ao qual foi atribuída,

por acordo intenacional, a massa de 1 quilograma. Cópias precisas desse cilindro

foram enviadas a laboratórios de padronização de ouros países e as massas de ouros

corpos podem ser determinadas comparando-os com uma dessas cópias. A Tabela

1-5 mostra algumas massas expressas em quilogramas, em uma faixa de aproximadamente 83 ordens de grandeza.

A cópia norte-americana do quilograma-padrão está guardada em um cofre do

IST e é removida, não mais do que uma vez por ano, para aferir duplicatas usadas

em outros lugares. Desde 1889, foi levada para a França duas vezes para compara

ção com o padrão primário.

Figua 1-3 O quilorama-padrão

intenacional de massa, um cilindro de

platina-irídio com 3,9 cm de altura e

3,9 cm de diâmetro. *(Cortesia do*

Bureau Intenacional de Pesos e

Medids, França)

$\frac{V_t}{1 + e}.$

$m_a = \rho_{SiO_2} V_g.$

$\frac{V_t}{1 + e}$

$= \frac{\rho_{SiO_2}}{1 + e}.$

PARTE 1

MEDIÇÃO

7

Um Segundo Padrão de Massa

Tabela 1-5

As massas dos átomos podem ser comparadas entre si mais precisamente que com o Algumas Massas Apoximadas quilograma-padrão. Por essa razão, temos um segundo padrão de massa, o átomo de

Massa em

carbono 12, ao qual, por acordo intenacional, foi atribuída uma massa de 12 unida Descrição

Quilogramas

ds de massa atômica (u). A relação entre as duas unidades é a seguinte:

Universo conhecido

1 **X** [illegible]

1 U = 1,660 538 86 X 1 0 -27 kg,

(1-7) Nossa galxia

2 **X** 11**1**

Sol

com uma incerteza de

2 **X** [illegible]

+ 10 nas duas últimas casas decimais. Os cienistas podem determinar experimentalmente, com razoável precisão, as massas de ouros átomos em Lua 7 **X** I OZ2

relação **à** massa do carbono 12. O que nos fala no momento é uma forma coniável Asteroide Eros 5 x [illegible]

de estender tal precisão a unidades de massa mais comuns, como o quilograma.

Montanha pequena

1 X 1011

Transalântico

7 X 107

Massa Especíica

Elefante

5 X 103

Uva

3 **X** 10 '

Como vamos ver no Capítulo 14, a massa espeica *p* de uma substância **é** a massa Grão de poeira 7 x 10-m

por unidade de volume:

Molécula de penicilina

5 **X** l 0-**17**

,

m

Atomo de urânio

4 X 10-25

p = *v* ·

(1-8) Próton

2 X 10 27

Elétron

9 x 10 - [illegible]

As massas especicas são normalmente expressas em quilogramas por mero cúbico ou

em gramas por cenímero cúbico. A massa específica da água (1,00 grama por cenímro cúbico) **é** muito usada para s de comparação. A massa específica da neve fresca **é** 10% da massa especica da água; a da plaina **é** 21 vezes maior que a da água.

xemplo

Massa específia e liquefação

Um objeto pesado pode afundar no solo durante um ter ***Cálculos*** O volume total ***V,*** de uma amosra **é** dado por remoto se o remor faz com que o solo passe por um prov

cesso de *liquefação,* no qual as partículas do solo deslil = *vp* [illegible] + *v*

•.

zam umas em relação às ouras quase sem arito. Nesse Subsituindo *Vv* pelo seu valor, dado pelaEq. 1-9, e explicaso, o solo se torna praticamente uma areia movediça. citando Vg, obtemos: A possibilidade de liquefação de um solo arenoso pode

ser prevista em termos do *índice de vazios* de uma amos

*V***g** =

(1-1 1)

tra do solo, representado pelo símbolo *e* e definido da

seguinte forma:

De acordo com a Eq. 1-8, a massa total m. das partículas

v.

de areia **é** o produto da massa específica do dióxido de sie =

(1-9) lício pelo volume total das paríulas de areia:

vs

(1-12)

onde *Vg* **é** o volume total das partículas de areia na amosra

e V

Subsituindo esta expressão na Eq. 1-1 O e subsituindo *V*

v **é** o volume total do espaço enre as partículas (isto

g

é, dos *vazios)*. Se *e* excede o valor críico de 0,80, pode pelo seu valor, dado pela Eq. 1-11, obtemos: ocorrer liquefação durante um terremoto. Qual **é** a massa

Ps,o,

específica da areia, p., correspondente ao valor crítico? A

Pa - .

(1-13)

massa especíica do dióxido de silício (principal componente da areia) **é**

Fazendo

Ps

Psio, = 2,600 **X** 10**3** kg/m**3** e e = 0,80 nesta equaio, = 2,600 **X** 103 kg/m3•

ção, descobrimos que a liquefação acontece quando a massa especíica da areia **é** menor que ID EIA-CHAVE

A massa especíica da areia **Pa** em uma amostra **é** a massa

Pa = 2,600 X 103 kg/m3 = 1 4 103 k / 3

por unidade de volume, ou seja, a razão enre a massa total

1 80

' **X**

g m .

'

m. das paríiculas de areia e o volume total ***V,*** da amosra:

(Resposta)

ma

Um ediício pode afundar vários meros por causa da li

Pa = V .

(1-10) quefação.

1

8

CAPÍTULO 1

REVISÃO E RESUMO

A Medição na Física A ísica se baseia na medição de randee as unidades são manipuladas como quantidades algébricas até que zas ísicas. Algumas gndezas físicas, como comprimento, tempo apenas as unidades desejadas permaneçam.

e massa, foram escolhidas como grandezas fundamentais; cada

uma foi definida através de um padrão e recebeu uma unidade de Comprimento O metro é deinido como a distância percorrida medida (como metro, segundo e quilograma). Outras grandezas pela luz durante um intervalo de tempo especiicado .

ísicas são defmidas em termos das grandezas fundamentais e de

seus padrões e unidades.

Tempo O segundo é deinido em termos das oscilaçõe s da luz emi

Unidades do SI O sistema de unidades adotado neste livro é o tida por um isótopo de um certo elemento qumico (césio 133). Sinais Sistema Intenacional de Unidades (SI). As três randezas físicas de tempo pecisos são enviads a todo o mundo por sinais de rádio sinmostradas na Tabela 1-1 são usadas nos primeiros capítulos. Os cronizados por relógios atômics em laboratórios de padronização.

padrões, que têm que ser acessíveis e invariáveis, foram estabele cidos para essas grandezas fundamenais por um acordo intenacio Massa O quilograma é definido em termos de um padrão de massa nal. Esses padrões são usados em todas as medições ísicas, tanto de platina-irídio mantido em um laboratório nas vizinhanças de Paris.

das grandezas fundamentais quanto das grandezas secundárias. A Para mdições em escala atômica, é comumente usada a unidade de notação científica e os preixos da Tabela 1-2 **são usados para sim massa atômica, deinida em termos do átomo de carbono** 12.

pliicar a notação das medições.

Massa específica A massa especfica *p* de uma substância é a

Mudança de Unidades A conversão de unidades pode ser feia massa por unidade de volume:

usando o método de *conversão em cadeia,* **no qual os dados originais**

n1

são multiplicados sucessivamente por atores de conversão unitários

$p = v\cdot$

(J-8)

P R O B L E M A S

1

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do probl ema

Informaões adicionais disponiveis em O *Circo Voador da sica* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 1-5 Comprimento

cúbicos). Para complear a tabela, que números (com três algaris

•1 A Terra tem a forma aproximada de uma esfera com 6,37 X 106 **mos signiicativos) devem ser inseridos (a) na coluna de cahizes, m de raio. Determine (a) a circunferência da Tera em quilômetros, (b) na coluna de fanegas, (c) na coluna de cuartillas e (d) na coluna (b) a área da superfície da Terra em quilômetros quadrados e (c) o de almudes? Expresse** 7,00 **almudes em (e) medios, () cahizes e volume da Terra em quilômeros cúbicos.**

(g) centímeros cúbicos (cm3).

•2 O *gy* é uma antiga medida inglesa de comprimento, denida

como 1/10 **de uma linha;** *linha* **é oura medida inglesa de compri**

Tabela 1-6

mento, denida como 1/12 **de uma polegada. Uma medida de com**
Poblema 6

primento usada nas gráficas é o *ponto,* **deinido como** 1n2 **de uma**

polegada. Quanto vale uma área de 0,50 **gry**2 **em pontos quadrados**

cahiz fanega cuanilla aln,ude medi o

(pontos2**)?**

1 cahíz =

2

•4 As dimensões das leras e espaços neste livro são expressas em 1 medio =

1

termos de pontos e paicas: 12 **pontos =** 1 **paica e** 6 **paicas =** 1 **pole gada. Se em uma das provas do livro uma igura apareceu deslocada de** 0,80 **cm em relação à posição correta, qual foi o deslocamento ••7 Os engenheiros hidráulicos dos Estados Unidos usam f (a) em paicas e (b) em pontos?**

quentemente, como unidade de volume de água, o *acre-pé,* **deinido como**

•5 Em um certo hipódromo da Inglaterra, um páreo foi disputado o volume de água necessário para cobrir 1 acre de terra até uma proem uma distância de 4,0 furlongs. Qual é a distância da corida em fundidade de 1 pé. Uma forte tempestade despejou 2,0 **polegadas (a) varas e (b) cadeias?** (1 **furlong =** 201,168 **m,** 1 **vara =** 5,0292 **m de chuva em 30 min em uma cidade com uma área de** 26 **m**2**• Que e uma cadeia =** 20,117 **m.)**

volume de água, em acres-pés, caiu sobre a cidade?

"6 Hoje em dia, as conversões de unidades mais comuns podem ••8 A ponte de Harvard, que aravessa o rio Charles, ligando Camser feias com o auxlio de calculadoras e computadores, mas é im bridge a Boston, tem um comprimento de 364,4 smoots mais uma portante que o aluno saiba usar uma tabela de conversão como as orelha. A unidade chamada de smoot tem como padrão a alura de do Apêndice D. A Tabela 1-4 é parte de uma tabela de conversão Oliver Reed Smoot, Jr., classe de 1962, **que foi carregado ou arraspara um sistema de medidas de volume que já foi comum na Es tado pela ponte para que ouros membros da sociedade estudantil panha; um volume de** 1 **fanega equivale a** 55,501 **dm**3 **(decmetros Lambda Chi Alpha pudessem marcar (com tinta) comprimentos de**

PARTE 1

MEDIÇÃO

9

1 smoot ao longo da ponte. As marcas têm sido refeitas semestral • 14 Um tempo de aula (50 min) é aproximadamente igual a 1 m i mente por membros da sociedade, normalmente em horários de pico, crosséculo. (a) Qual é a duração de um microsséculo em minutos?

para que a polícia não possa interferir facilmente. (Inicialmente, os (b) Usando a relação policiais talvez tenham se ressentido do fato de que o smoot não

era uma unidade fundamental do SI, mas hoje parecem conformaerro

1

percentua = (real - aproximado

-

-

- - -

-

)

- 10,

real

dos com a brincadeira.) A Fig. 1-4 mostra três sementos de reta

paralelos medidos em smoots (S), willies (/), e zeldas (Z). Quanto determine o erro percentual dessa aproximação.

vale uma disância de 50,0 smoots (a) em willies e (b) em zeldas? • 15 O fortnight é ua curiosa medida inglesa de tempo igual a 2,0 semanas (a palavra é uma contração de "fourteen nights", ou

o

32

212 s **seja, quatorze noites). Dependendo da companhia, esse tempo pode**

1

1

o

passar depressa ou transformar-se em uma interminável sequência

8

de microssegundos. Quantos microssegundos tem um fortnight?

1

1

\V

0

216

• 16 Os padrões de tempo são baseados atualmente em relógios

z

atômicos, mas outra possibilidade seria usar os *pulsares,* **esrelas**

Figua 1-4 Problema 8 .

de nêurons (estrelas altamente compactas, compostas apenas de

nêurons) que possuem um movimento de rotação. Alguns pulsares

••9 A Antártica é aproximadamente semicircular, com um raio giram com velocidade constante, produzindo um sinal de rádio que de 2000 m (Fig. 1-5). A espessura média da cobertura de gelo é passa pela superície da Terra uma vez a cada rotação, como o feixe 3000 m. Quantos centímetros cúbicos de gelo contém a Antártica? luminoso de um farol. O pulsar PSR 1937 +21 é um exemplo; ele (Ignore a curvatura da Terra.)

gira uma vez a cada 1,557 806 448 872 75 +3 ms, onde o símbolo

ç'ºº

+3 indica a incerteza na última casa decimal (e *ão* +3 ms). (a)

k111

Quantas roações o PSR 1937+21 executa em 7,00 dias? b) Quanto

3000 11, T

tempo o pulsar leva para girar exaamente um milhão de vezes e (c)

qual é a incerteza associada?

Figua 1-5 Problema 9 .

• 17 Cinco relógios estão sendo testados em um laboratório. Exa

São 1-6 Tempo

tamente ao meio-dia, de acordo com o Observatório Nacional, em

dias sucessivos da semana, as leituras dos relógios foram anotadas

•10 Até 1913, cada cidade do Brasil tinha sua hora local. Hoje na tabela a seguir. Coloque os relógios em ordem de onfiabilidade, em dia, os

viajantes acertam o relógio apenas quando a variação de começando pelo melhor. Jusiique sua escolha.

tempo é igual a 1,0 h (o que corresponde a um uso horário). Que

distância, em média, uma pessoa deve percorrer, em graus de lon

Relógio Dom

Seg

Ter

Qua

Qui

Sex

Sáb

gitude, para passar de um fuso horário a outro e ter que acerar o

relógio? *(Sugestão:* **a Tera gira 360º em aproximadamente 24 h.)**

A

1 2:36:40 12:36:56 12:37:12 12:37:27 12:37:44 12:37:59 12:38:14

B

l l :59:59 12:00

•11 Por cerca de 10 anos após a Revolução Francesa, o governo

:02 1 1 :59:57 12:00:07 12:00:02 1 1 :59:56 12:0:03

francês tentou bsear as medidas de tempo em múltiplos de dez: uma

e 15:50:45 15:51 :43 15:52:41 J 5:53:39 15:54:37 15:55:35 15:56:33

semana tinha 10 dias, um dia tinha 10 horas, uma hora consistia em

D

12:03:59 12:02:52 12:01:45 12:00:38 1 1:59:31 1 1 :58:24 11:57:17

100 minutos e um minuto consistia em 100 segundos. Quais são as

E

12:03:59 12:02:49 12:01:54 12:01 :52 12:01 :32 12:01 :22 12:01:12

razões (a) da semana decimal francesa para a semana comum e (b)

do segundo decimal francês para o segundo comum?

• • 18 Como a velocidade de rotação da Terra está diminuindo gra

• 12 A planta de crescimento mais rápido de que se tem notícia é dualmente, a duração dos dias está aumentando: o dia no final de uma *Hesperoyucca whipplei* **que cresceu 3,7 m em 14 dias. Qual 1,0 século é 1,0 s mais longo que o dia no início do século. Qual foi a velocidade de crescimento da planta em micrômetros por se é o aumento da duração do dia após 20 séculos?**

gundo?

• ••19 Suponha que você esteja deitado na praia, perto do Equador,

•13 Três relógios digitais, *A*, *B* e C, uncionam com velocidades vendo o Sol se pôr em um mar calmo, e liga um cronômero no modiferentes e não têm leituras simultâneas de zero. A Fig. 1-6 mostra mento em que o Sol desaparece. Em seguida, você se levana, desl o leituras simulâneas de pares dos relógios em quatro ocasiões. (Na cando os olhos para cima de uma distância *H* = 1,70 m, e desliga o primeira ocasião, por exemplo, *B* indica 25,0 s e *C* indica 92,0 s.) cronômeo no momento em que o Sol volta a desaparecr. Se o tempo Se o intervalo entre dois eventos é 600 s de acordo com o relógio *A*, indicado pelo cronômetro é *t* = 11,1 s, qual é o raio da Terra?

qual é o intervalo entre os eventos (a) no relógio *B* e (b) no relógio

C? (c) Quando o relógio *A* indica 400 s, qual é a indicação do reló Seçãol-7 lassa gio *B?* (d) Quando o relógio *C* indica 15,0 s, qual é a indicação do •20 O recorde para a maior garrafa de vidro foi estabelecido em relógio *B?* (Suponha que as leiuras sejam negaivas para instantes 1992 por uma equipe de Millville, Nova Jersey, que soprou uma anteriores a zero.)

garafa com um volume de 193 galões americanos. (a) Qual é a

diferença entre esse volume e 1,0 milhão de cenímeros cúbicos?

312

512

(b) Se a garrafa fosse enchida com água a uma vazão de 1,8 g/min,

,---------,-- ***A*** (s)

25,0

em quanto tempo estaria cheia? A massa especíica da água é

]5

0

90

---,----------, ------ ***B*** (s)

1000 kg/m3•

92,0

142

•21 A Terra tem uma massa de 5,98 X **10**24 **kg. A massa média**

------------------ C(s)

dos átomos que compõem a Terra é 40 u. Quantos átomos existem

Figua 1-6 Problema 13.

na Terra?

•22 O ouro, que tem uma massa específica de 19,32 g/cm3, é um entre as barras de chocolate seja tão pequeno que pode ser despremetal extremamente dúcil e maleável, isto é, pode ser transformado zado. Se a alura das barras de chocolate no recipiente aumenta à em fios ou folhas muito nas. (a) Se uma amostra de ouro, com uma taxa de 0,250 cm/s, qual é a taxa de aumento da massa das barras massa de 27,63 g, é prensada até se tornar uma folha com 1,000 ,*m* de chocolate que estão no recipiente em quiloramas por minuto?

de espessura, qual é a área dessa folha? (b) Se, em vez disso, o ouro

é transformado em um io cilíndrico com 2,500 .*m* de raio, qual é **Problemas dicionais** o comprimento do io?

32 Nos Estados Unidos, uma casa de boneca tem uma escala de

•23 (a) Supondo que a água tenha uma massa especíica de exata 1:12 em relação a uma casa de verdade (ou seja, cada distância na mente 1 g/cm**3,** determine a massa de um mero cúbico de áua em casa de boneca é 1/12 da distância correspondente na casa de verquilogramas. **b)** Suponha que sejam necessárias 10,0 h para drenar dade) e uma casa em miniatura (uma casa de boneca feita para caum recipiente com 5700 m**3** de água. Qual é a "vazão

mássica" da ber em uma casa de boneca) tem uma escala de 1:144 em relação a água do recipiente, em quilogramas por seundo?

uma casa de verdade. Suponha que uma casa de verdade (Fig. 1-7)

• •24 Os grãos de areia das praias da Califónia são aproximada tenha 20 m de comprimento, 12 m de largura, 6,0 m de alura, e um mente esféricos, com um raio de 50 *.m*, e são feitos de dióxido de telhado inclinado padrão (com o pel de um triângulo isósceles) silício, que tem uma massa especíica de 2600 kg/m**3**

de 3,0 m de alura. Qual é o volume, em meros cúbicos, (a) da casa

• Que massa de

grãos de areia possui uma área supericial otal (soma das áreas de de bonecas e **b)** da casa em miniatura correspondente?

todas as esferas) igual à área da superfície de um cubo com 1,00 m

de aresa?

• •25

- Durante uma tempestade, parte da encosa de uma

montanha, com 2,5 km de larura, 0,80 km de altura ao longo da

T

encosta e 2,0 m de espessura, desliza até um vale em uma avalan

3,0 1n

che de lama. Suponha que a lama ique disribuída uniformemente

_

em uma área quadrada do vale com 0,40 km de lado e que a lama

tem uma massa especíica de 1900 kg/m**3**

B B

• Qual é a massa da lama

6,0 n1

existente em uma área de 4,0 m**2** do vale?

B B

• •26 Em um centmero cúbico de uma nuvem cúmulo típica exisl

tem de *50* a 500 gotas d'áua, com um raio típico de 10 *µ,m.* Para

essa faixa de valores, determine os valores mínimo e máximo, respectivamente, das seguintes grandezas: (a) número de meros cú **Figura 1-7** Problema 32.

bicos de água em uma nuvem cúmulo cilíndrica com 3,0 km de altura e 1,0 m de raio; (b) número de garrafas de 1 liro que podem 33 A tonelada é uma mdida de volume frequentemente empregada ser enchidas com essa quantidade de água; (c) a massa da água no transporte de mecadorias, mas seu uso requer uma cera cautecontida nessa nuvem, sabendo que a massa especíica da água é la, pois existem pelo menos três tipos de tonelada: uma *tonelada de* 1000 kg/m**3**

deslocamento é i

•

ual a 7 barrels bulk, uma *tonelaa de frete* é igual

••27 A massa especíica do ferro é 7,87 g/cm**3** e a massa de um a 8 barels bulk, e una *onelada* ***e*** *registo* é igual a 20 barrels bulk.

átomo de fero é 9,27

O *barrel bulkéoura* medida de volume: 1 barrel bulk = 0,1415 m**3•**

X 1 0 -26 kg. Se os átomos são esféricos e estão

densamente compactados, (a) qual é o volume de um átomo de ferro
Suponha que você esteja analisando um pedido de "73 toneladas"

e **b)** qual é a distância enre os centros de dois átomos vizinhos?

de chocolate M&M e tenha certeza de que o cliente que fez a encomenda
usou "tonelada" como unidade de volume (e não de peso ou

••28 Um mol de átomos contém 6,02 **X** 10**23** átomos. Qual é a de massa,
como será discuido no Capíulo 5). Se o cliente estava ordem de grandeza do
número de mols de átomos que existem em pensando em toneladas de
deslocamento, quantos alqueires norteum gato grande? As massas de um
átomo de hidrogênio, de um americanos em excesso você vai despachar se
interprear equivoca

átomo de oxigênio e de um átomo de carbono são 1,0 u, 16 u e damente o
pedido como (a) 73 toneladas de frete e (b) 73 toneladas 12 u,
respectivamente.

de regisro? (1 m**3** = 28,378 alqueires norte-americanos.)

• •29 Em uma viagem à Malásia, você não resiste à tenação e com 34 Dois
tipos de *barril* foram usados como unidades de volume pra um touro que
pesa 28,9 piculs no sistema local de unidades de na década de 1920 nos
Estados Unidos. O barril de maçã tinha um peso: 1 picul = 100 gins, 1 gin =
16 tahils, 1 tahil = 10 chees e 1 volume oicial de 7056 polegadas cúbicas; o
barril de cranberry, chee = 10 hoons. O peso de 1 hoon corresponde a uma
massa de 5826 polegadas cúbicas. Se um comerciante vende 20 barris de
0,3779 g. Quando você despacha o boi para casa, que massa deve cranberry
a um freguês que pensa estar recebendo baris de maçã, declarar à alfândega?
(Sugestão: use conversões em cadeia.)

qual é a diferença de volume em litros?

••30 Despeja-se água em um recipiente que apresenta um vaza 35 Uma aniga poesia infantil inglesa diz o seguinte: "Little Miss mento. A massa ***m*** de água no recipiente em função do tempo ***t*** é Mufet sat on a tuffet, eating her curds and whey, when along cne dada por *m* = 5,00&·**8 -** *3,00t* + 20,00 para *t;* O, onde a massa está a spider who sat down beside her ... " ("A pequena Miss Mufet em gramas e o tempo em segundos. (a) Em que instante a massa de estava sentada em um banquinho, comendo queijo cotage, quan

água é máxima? (b) Qual é o valor dessa massa? Qual é a taxa de do chegou uma aranha e sentou-se ao seu lado ... ") A aranha não variação da massa, em quilogramas por minuto, (c) em *t* = 2,00 s se aproximou por causa do queijo e sim porque Miss Mufet inha e (d) em *t* = *5,0* s?

1 1 tufes de moscas secas. O volume de um tuffet é dado por 1

•••31 Um recipiente verical cuja base mede 14,0 cm por 17,0 cm tuffet = 2 pecks = *0,50* Imperial bushel, onde 1 Imperial bushel =

está sendo enchido com barras de chocolate que possuem um volume 36,3687 liros (L). Qual era o volume das moscas de Miss Mufet de 50 mm**3** e uma massa de 0,0200 g. Suponha que o espaço vazio em (a) pecks; (b) Imperial bushels; (c) litros?

PARTE 1

MEDIÇÃO

1 1

36 A Tabela 1-7 mosra alumas unidades antigas de volume de 45 (a) O *shake* **é uma unidade de tempo usada informalmente pelos líquidos. Para completar a tabela, que números (com rês algarismos físicos nucleares. Um shake é iual a 10·8 s. Existem mais shakes signiicativos) devem ser introduzidos (a) na coluna de weys; (b) na em um seundo que seundos em um ano? (b) O homem existe há coluna de chaldrons; (c) na coluna de bags; (d) na coluna de potles; aproximadamente 10**6 **anos, enquanto a idade do universo é cerca (e) na coluna da gills?** () **O volume de 1 bag equivale a 0,1091 m3• de 101º anos. Se a idade do universo for deinida como 1 "dia do Em uma história antiga, uma feiticeira prepara uma poção mágica universo" e o "dia do universo" for dividido em "segundos do uniem um caldeirão com um volume de 1,5 chaldron. Qual é o volume verso", da mesma forma como um dia comum é dividido em s e do caldeirão em metros cúbicos?**

gundos comuns, quantos segundos do universo se passaram desde

que o homem começou a exisir?

Tabela 1-7

46 Uma unidade de área frequentemente usada para medir trrenos

é o *hecare,* **deinido como 10**4 **m**2**• Uma mina de carvão a céu aberto oblema 36**

consome anualmente 75 hectares de terra até uma proundidade de

wey

chaldron

bag

pottle

gill

26 m. Qual é o volume de tera removido por ano em quilômetros

cúbicos?

1 wey =

1

10/9

40/3

640

120 240 47 Uma unidade asronômica (UA) é a distância média entre a

1 chaldron =

Tera e o Sol, aproximadamente 1,50 X 108 m. A velocidade da

1 bag =

luz é aproximadamente 3,0 X 108 m/s. Expresse a velocidade da luz

1 pottle =

em unidades astronômicas por minuto.

1 gill =

48 A toupeira comum tem uma massa da ordem de 75 g, que corresponde a cerca de 7,5 mols de átomos. (Um molde átomos equivale a 6,02 X 1023 **átomos.) Qual é a massa média dos átomos de 37 Um cubo de açúcar típico tem 1 cm de aresta. Qual é o valor da uma toupeira em unidades de massa atômica (u)?**

aresa de uma caixa cúbica com capacidade suiciente para conter 49 Uma unidade de comprimento tradicional no Japão é o ken (1

um mol de cubos de açúcar? (Um mol = 6,02 X 1023 **unidades.)**

ken = 1,97 m). Determine a razão (a) entre kens quadrados e m e 38 Um anigo manuscrito revela que um proprietário de terras no tros quadrados e (b) entre kens cúbicos e meros cúbicos. Qual é o tempo do rei Artur possuía 3,00 acres de terra cultivada e uma área volume de um anque de água cilíndrico com 5,50 kens de altura e para criação de gado de 25,0 perchas por 4,00 perchas. Qual era a 3,00 kens de raio (c) em kens cúbicos e (d) em meros cúbicos?

área total (a) na antiga unidade de roods e (b) na unidade mais mo 50 Você recebeu ordens para navegar 24,5 milhas na direção leste, derna de metros quadrados? 1 acre é uma área de 40 perchas por 4 com o objeivo de posicionar seu baco de salvamento exaamente soperchas, 1 rood é uma área de 40 perchas por 1 percha, e 1 percha bre a psição de um navio pirata afundado. Quando os mergulhadores equivale a 16,5 pés.

não enconam nenhum sinal do navio, você se comunica com a base

39 Um turista norte-americano compra um carro na Inglaterra e e descobre que deveria ter percorrido 24,5 *milhas náuticas* **e não mio despacha para os Estados Unidos. Um adesivo no carro informa lhas comuns. Use a abela de conversão de unidades de comprimento que o consumo de combustível do carro é 40 milhas por galão na do Apêndice D para calcular a disância horizonal em quilômeros esada. O turista não sabe que o galão inglês é diferente do galão entre sua posição atual e o lcal onde o navio piraa afundou.**

norte-americano:

51 O cúbito é uma antiga unidade de comprimento baseada na dis1 galão inglês = 4,546.090.0 litros tância enre o cotovelo e a ponta do dedo médio. Suponha que essa

1 galão norte-americano = 3,785 411 8 litros

disância estivesse entre 43 e 53 cm e que gravuras antigas mosrem

Para fazer uma viagem de 750 milhas nos Estados Unidos, de quan que uma coluna cilíndrica tinha 9 cúbitos de altura e 2 cúbitos de tos galões de combustível (a) o turista pensa que precisa e (b) o u diâmetro. Determine os valores mínimo e máximo, respectivamenrista realmente precisa?

te, (a) da altura da coluna em metros; (b) da altura da coluna em

40 Usando os dados fonecidos neste capítulo, determine o número milímeros; (c) do volume da coluna em metros cúbicos.

de átomos de hidrogênio necessários para obter 1,0 kg de hidrogê 52 Para ter uma ideia da diferença enre o anigo e o modeno e ennio. Um átomo de hidrogênio tem uma massa de 1,0 u.

tre o rande e o pequeno, considere o seguinte: na antiga Inglaterra

41 O

rural, 1 hide (enre 100 e 120 acres) era a área de terra necessária

cord **é um volume de madeira cortada correspondente a uma**

pilha de 8 pés de comprimento, 4 pés de lar

para sustentar uma famHia com um arado durante um ano. (Uma

ura e 4 pés de altura.

Quantos cords exisem em 1,0 m3 de madeira?

área de 1 acre equivale a 4047 m2.) **Além disso, 1 wapenake era**

a área de tera necessária para sustentar 100 farm1ias nas mesmas

42 Uma molécula de água (H20) **contém dois átomos de hidro condições. Na física quântica, a área da seção reta de ch gênio e um átomo de**

oxigênio. Um átomo de hidrogênio tem uma

que de

um núcleo (deinida através da probabilidade de que ua partícula

massa de 1,0 u e um átomo de oxigênio tem uma massa de 16 u, incidente seja absorvida pelo núcleo) é medida em bns; 1 bam =

aproximadamente. (a) Qual é a massa de uma molécula de água em 1 X 10- 8 **m**2**• (No jargão da física nuclear, se um núcleo é "**

quilogramas? (b) Quanas moléculas de á

rande",

ua existem nos oceanos

acertá-lo com uma partícula é ão fácil quanto acertar um tiro em um

da Terra, cuja massa estimada é 1,4 X 1021 **kg?**

celeiro.) Qual é a razão entre 25 wapentakes e 1 1 barns?

43 Uma pessoa que está de dieta pode perder 2,3 kg por semana. 53 A *unidde astronômica* **(UA) é a disância média entre a Ter**

Expresse a taxa de perda de massa em miliramas por segundo, ra e o Sol, cerca de 92,9 X 106 **milhas. O** *parsec* **(pc) é a distância como se a pessoa pudesse sentir a perda segundo a segundo.**

para a qual uma distância de 1 UA subtende um ânulo de exaa44 Que massa de água caiu sobre a cidade no Problema 7? A massa mente 1 seundo de arco (Fig. 1-8). O *ano-luz* **é a distância que a especíica da água é 1,0 X 103 kg/m3.**

luz, viajando no vácuo com uma velocidade de 186.000 milhas por

/

segundo, percorre em 1,0 ano. Expresse a disância entre a Terra e 54 Uma certa marca de tinta de parede promete uma cobertura de o Sol (a) em parsecs e (b) em anos-luz.

460 pés quadrados por galão. (a) Expresse esse valor em meros

quadrados por litro. b) Expresse esse valor em uma unidade do SI

Uni ingulo ele

(veja os Apêndices A e D). (c) Qual é o inverso da grandeza origicxaLarncntc

l segundo

nal e (d) qual é o signiicado ísico da nova grandeza?

l pc

[illegible] [illegible] **UA**

1 c'

Figua 1-8 Problema 53.

CAPÍTULO

MOVIMENTO RETILINEO

' o UE É FÍSICA?

Um dos objetivos da ísica é estudar o movimento dos objetos: a rapidez com

que se movem, por exemplo, ou a distância que pecorrem em um dado intervalo de

tempo. Os engenheiros da NASCR são fanáicos por este aspecto da ísica, que os

ajuda a avliar o desempenho dos carros antes e durante as corridas. Os geólogos

usam esta física para estudar o movimento de placas tectônicas, na tentaiva de prever

terremotos. Os médicos necessitam dessa física para mapear o fluxo de sangue em

um paciente quando examinam uma artéria parcialmente obstruída, e motoristas a

usam para reduzir a velocidade e escapar de uma multa quando percebem que existe

um radar à rente. Existem inúmeros outros exemplos. Neste capítulo, estudamos

a física básica do movimento nos casos em que o objeto (carro de corida, placa

tectônica, célula sanguínea ou qualquer ouro) esá se movendo em linha reta. Este

tipo de movimento é chamado de *movimento unidimensional.*

2-2 Movimento

O mundo, e tudo que nele existe, está sempre em movimento. Mesmo objetos aparentemente estacionários, como uma estrada, estão em movimento por causa da rotação da Tera, da órbita da Terra em tono do Sol, da órbita do Sol em tono do centro da

Via Láctea e do deslocamento da Via Láctea em relação às ouras galáxias. A classificação e comparação dos movimentos (chamada de **cinemática)** podem ser um desio. O que exatamente deve ser medido? Com que deve ser comparado?

Antes de tentar responder a estas perguntas, vamos examinar algumas propriedades gerais do movimento unidimensional, restringindo a análise de três formas: **1.** Vamos supor que o movimento se dá ao longo de uma linha reta. A trajetória pode

ser vertical, horizontal ou inclinada, mas dve ser retilínea.

2. As forças (empurrões e puxões) modificam o movimento, mas não serão discuidas

até o Capítulo 5. Neste capítulo, vamos discutir apenas o movimento em si e suas

mudanças, sem nos preocupar com as causas. O objeto está se movendo cada vez

mais depressa, cada vez mais devagar, ou o movimento mudou de direção? Se o

movimento esá mudando, essa mudança é brusca ou gradual?

3. Vamos supor que o objeto em movimento é uma **parícla** (ou seja, um objeto

pontual, como um eléron) ou um objeto que se move como uma parícula (isto é,

todas as partes do objeto se movem na mesma direção e com a mesma rapidez).

Assim, por exemplo, podemos imaginar que o movimento de um porco rígido

deslizando em um escorrega é semelhante ao de uma parícula; não podemos dizer o mesmo, porém, de uma bola rolando em uma mesa de sinuca.

2-3 Posição e Deslocamento

Localizar um objeto signiica determinar a posição do objeto em relação a um ponto

de referência, requentemente a **origem** (ou ponto zero) de um eixo como o eixo ***x***

$\Delta x = x_2 - x_1.$

14

CAPÍTULO 2

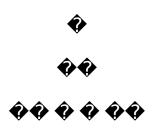
Sentido positivo

da Fig. 2-1. O **sentido posiivo** do eixo é o senido em que os números (coordenadas) que indicam a posição dos objetos aumentam de valor, que, na Fig. 2-1, é para **Sentido neativo**

a direita. O sentido oposto é o **senido negaivo.**

1

x (m)

- 3 - 2 - 1 O

1

2

3

Assim, por exemplo, uma parícula pode estar localizada em x = 5 m, o que significa que esá a 5 m da origem no senido posiivo. Se estivesse localizada em x =

Oigem)

-5 m, estaria também a 5 m da origem, mas no senido oposto. Sobre o eixo, uma

Figua 2-1 A posição é assinalada

coordenada de -5 m é menor que uma coordenada de -1 m e ambas são menores

em um eixo marcado em unidades de

que uma coordenada de + 5 m. O sinal posiivo de uma coordenada não precisa ser

comprimento (meros, por exemplo),

que se estende indefinidamente nos

mosrado explicitamente, mas o sinal negaivo deve sempre ser mostrado.

dois sentidos. O nome do eixo, ***x,*** por

A uma mudança de uma posição x ***1*** para uma posição x ***2*** é associado um **deslo**

exemplo, aparece sempre no lado

camento *X*, dado por

positivo do eixo em relação à origem.

(2-1)

(O símbolo ., a lera grega delta maiúsculo, é usada para representar a variação de

uma grandeza e corresponde à diferença enre o valor final e o valor inicial.) Quando aribuímos números às posições x ***1*** e x ***2*** da Eq. 2-1, um deslocamento no sentido posiivo (para a direita na Fig. 2-1) sempre resulta em um deslocamento positivo e

um deslocamento no senido oposto (para a esquerda na igura) sempre resulta em

um deslocamento negaivo. Assim, por exemplo, se uma partícula se move de x *1* =

5 m para x ***2*** = 12 m, *X* = (12 m)- (5 m) = +7 m. O resultado posiivo indica que o movimento **é** no senido positivo. Se, em vez disso, a partícula se move de x *1* =

5 m para x2 = 1 m, *X* = (1 m) - (5 m) = -4 m. O resultado negaivo indica que

o movimento é no senido negaivo.

O número de meros pecorridos é irrelevante; o deslocamento envolve apenas

as posições inicial e inal. Assim, por exemplo, se a parícula se move de x = 5 m

parax = 200 m e, em seguida, volta parax = 5 m, o deslocamento é *X* = (5 m) -

(5 m) = O.

O sinal positivo do deslocamento não precisa ser mostrado, mas o sinal negativo deve sempre ser mostrado. Quando ignoramos o sinal (e, portanto, o senido) do deslocamento, ficamos com o **módulo** do deslocamento. Assim, por exemplo, a um

deslocamento *X* = -4 m corresponde um módulo de 4 m.

O deslocamento **é** um exemplo de **grandza vetorial,** uma grandeza que possui um módulo e uma orientação. Os vetores serão discutidos com mais detahes no Capítulo 3 (na verdade, talvez alguns estudantes já tenham lido esse capítulo), mas

tudo de que necessitamos no momento **é** a ideia de que o deslocamento possui duas

caracterísicas: (1) o *módulo* é a distância (como, por exemplo, o número de metros)

enre as posições inicial e final; (2) a *orientação*, de uma posição inicial para uma

posição inal, que pode ser representada por um sinal positivo ou um sinal negativo

se o movimento for retilíneo.

O que se segue é o primeiro dos muitos testes que o leitor encontrará neste livo.

Os testes contêm uma ou mais questões cujas resposts requerem um raciocínio

ou cálculo mental e permitem veriicar a compreensão do ponto discutido.

As respostas aparecem no inal do livro.

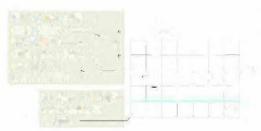
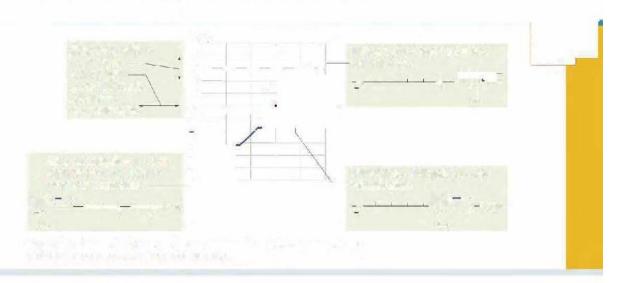
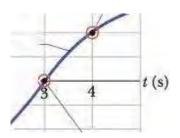
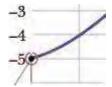
-TESTE 1

Considere rês pares de posições iniciais e inais, respectivamente, ao longo do eixo

x. A que pares corespondem deslcamentos negativos: (a) -3 m, +5 m; (b) -3 m,

-7 m; (c) 7 m, -3 m?

2-4 Velocidade Média e Velocidade Escalar Média

Uma forma compacta de descrever a posição de um objeto é desenhar um gráfico da posição *x* em função do tempo *t*, ou seja, um gráico de *x(t)*. [A notação *x(t)* representa uma função x de ***t*** e não o produto de x por t.] Como exemplo simples,

tempos.

a Fig. 2-2 mosra a função posição *x(t)* de um tau em repouso (ratado como uma

partícula) durante um intervalo de tempo de 7 s. A posição do animal tem sempe o

mesmo valor, *x* = -2 m.

A Fig. 2-3 é mais inteessante, já que envolve movimento. O tatu é avistado em

t = O, quando está na posição *x* = -*5* m. Ele se move no senido de *x* = O, passa por esse ponto em *t* = 3 s e continua a se deslocar para maiores valores positivos de *x.* A Fig. 2-3 mosra também o movimento real do tatu em linha eta, aravés do desenho

da posição em que o atu se enconra em rês insantes de tempo. O gráfico da Fig.

2-3 é mais absrato e bem diferente daquilo que o leitor realmente veria, mas é muito

mais rico em informações. Ele também revela com que rapidez o tatu se move.

Na verdade, várias grandezas estão associadas à expessão "com que rapidez".

Uma é a **velocidade mdia** vmd• que é a razão enre o deslocamento *X* e o intervalo de tempo .t durante o qual esse deslocamento ocore:

(2-2)

A noação significa que a posição é x**1** no instante **t1** e x**2** no instante ***t2*•** A unidade de vmd no Sistema Intenacional de Unidades (SI) é o mero por segundo (m/s). Outras

unidades são usadas em alguns problemas, mas todas estão na forma de comprimento/tempo.

Em um gráico de *x* em função de *t*, vméd é a **inclinação** da reta que liga dois pontos particulares da curva *x(t):* um dos pontos corresponde a i e **t2** e o ouro a x**1**

e **t**1• Da mesma forma que o deslocamento, vméd também possui um módulo, uma

x (rn)

Este é um gráfico

4

Está em ***x* =** 2 m para *t* **=** 4 s.

da posição

3

xem função

-------- [illegible] -Plotado aqui.

2

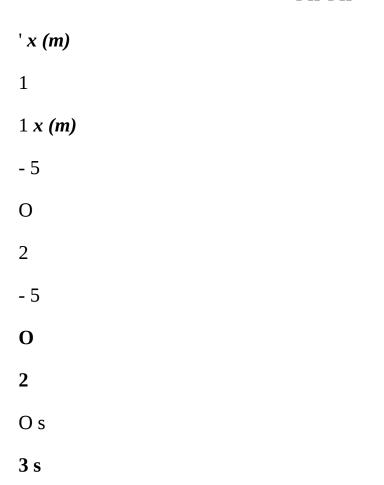
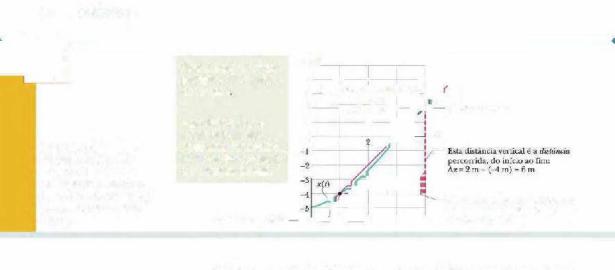
do tempo *t* para

1

1

x(t)

- 5

o

Figua 2-3 Gráfico de *x(t)* **para um tau em movimento. Posições sucessivas do tau também são mosradas para três insantes de tempo.**

X (m)

Este é um gráfico da

posição ***x*** em função

41-

-1-

-

-

-1

do tempo *t*.

Esta distância horizontal é o tempo

de percurso, do início ao irn:

tempos.

Início do intenalo - -=__L _

_

_J

.*t*= 4 **s -** 1 **s** = 3 **s**

direção e um sentido (também é uma grandeza vetorial). O módulo é valor absoluto

da inclinação da reta. Um valor positivo de vméd (e da inclinação) signiica que a reta

está inclinada para cima da esquerda para a direita; um valor negaivo de v (e da

md

inclinação) significa que a reta esá inclinada para baixo da esquerda para a direita

A velocidade média v éd tem sempre o mesmo sinal do deslocamento *x* porque *Ât*

m

na Eq. 2-2 é sempre posiivo.

A Fig. 2-4 mostra como detrminar v na Fig. 2-3 para o intervalo de tempo de

md

t = 1 s a *t* = 4 s. Traçamos a linha reta que une os pontos correspondentes ao início e ao final do intervalo de tempo considerado. Em seguida, calculamos a inclinação

xi *Ât* da linha reta. Para o intervalo de tempo dado, a velocidade média é

6 m

vd =

= 2 /s.

3s

A velocidade scalar mdia sméd é uma forma diferente de descrever "com que

rapidez" uma partícula está se movendo. Enquanto a velocidade média envolve o

deslocamento da parícula, *x*, a velocidade escalar média é definida em termos da

distância total percorida (o número de meros percorridos, por exemplo), independentemente da direção. Assim, distância total

S

(2-3)

mél =

ll

Como a definição de velocidade escalar média *não inclui* a direção e o senido do

movimento, ela não possui um sinal algébrico. Em alguns casos, s é

m d é igual (a não

ser pela ausência de sinal) a vméd· Enretanto, como é demonstrado no Exemplo 2-1,

as duas velocidades podem ser bem diferentes.

xemplo

Velocidade média de um caro velho

Depois de dirigir um carro em uma esrada retilínea por

IDEIA-CHAVE

8,4 km a 70 k/h, você para por falta de gasolina Nos 30

min seguintes, você caminha por mais 2,0 km ao longo da Suponha, por conveniência, que você se move no sentido estrada até chegar a um posto de gasolina.

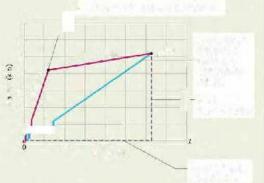
positivo do eixo *x*, da posição inicial *x1* = O até a posição

inal [illegible] no posto de gasolina. Essa segunda posição deve

(a) Qual foi o deslocamento total, do início da viagem até [illegible] 8,4 km + 2,0 km = 10,4 km. O deslocamento *x* chegar ao posto de gasolina?

ao longo do eixo *x* é a diferença enre a segunda posição

. .

e a pnmerra.

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

17

Cálculo De acordo com a Eq. 2-1, temos:

Para determinar v éd graficamente, raçamos o gráfico

m

lx = *x1*

da unção *x(t),* como mosra a Fig. 2-5, onde os pontos

- *x* 1 = 10,4 km - O = 10,4 km. (Resposta) de partida e chegada são a origem e o ponto assinalado Assim, o deslocamento total é 10,4 km no senido posii como "Posto". A velocidade média é a inclinação da reta vo do eixo x.

que une esses pontos, ou seja, v é a razão enre a *eleva*

md

(b) Qual é o intervalo de tempo *lt* enre o início da viagem *ção (x* = 10,4 km) e o *curso (lt* = 0,62 h), o que nos dá e o instante em que você chega ao posto?

V éd = 16,8 km/h.

m

(d) Suponha que para encher um bujão de gasolina, pagar

IDEIA-CHAVE

e caminhar de volta para o carro você leva 45 min. Qual

J á sabemos quanto tempo você passou caminhando, é a velocidade escalar média do início da viagem até o *ltam* (0,50 h), mas não sabemos quanto tempo você passou momento em que você chega de volta ao lugar onde deidirigindo, *ltw,·* Sabemos, porém, que você viajou 8,4 km xou o carro?

de carro a uma velocidade média v d

md ir

• = 70 km/h. Esta

velocidade média é igual à razão enre o deslocamento do

IDEIA-CHAVE

carro e o intervalo de tempo correspondente a esse des A velocidade escalar média é a razão enre a distância total locamento.

percorrida e o tempo gasto para percorrer essa distância.

Cálculos Em primeiro lugar, sabemos que

Cálculo A distância total é 8,4 km + 2,0 km + 2,0 km **=**

.. dir

12,4 km. O intervalo de tempo total é 0,12 h + 0,50 h +

Vméd.dir= **A/. . •**

0,75 h **=** 1,37 h. Assim, de acordo com a Eq. 2-3,

' ·dor

1

Explicitando *lt*

-

-

d -

-

a pé supõe uma caminhada com velocidade constante .) A

.l

0,62 h

inclinação da reta que liga a origem ao ponto "Posto" é a

= 16,8 km/h = 17 km/h.

(Resposta) **velocidade média para o percurso até o posto.**

-

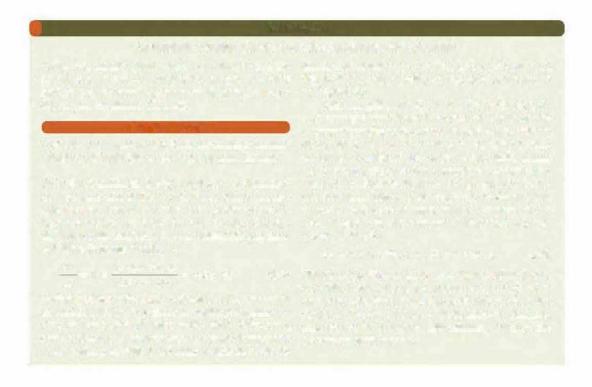
2-5 Velocidade Instantânea e Velocidade Escalar

Instantânea

Vimos até agora duas formas de descrever a rapidez com a qual um objeto se move:

a velocidade média e a velocidade escalar média, ambas medidas para um intervalo

de tempo *lt.* Entreanto, quando falamos em "rapidez", em geral estamos pensando na rapidez com a qual um objeto está se movendo em um certo instante, ou seja, na

velocidade instantânea (ou, simplesmente, **velocidade)** *v.*

A velocidade em um dado instante é obtida a partir da velocidade média reduzindo o intervalo de tempo *.t* até tomá-lo próximo de zero. Quando *.t* diminui, a velocidade média se aproxima cada vez mais de um valor limite, que é a velocidade

instantânea:

l. *.x dx*

V **=** Jm

=

.

t.t > *O .i*

dr

(2-4)

Observe que *v* é a taxa com a qual a posição *x* está variando com o tempo em um dado instante, ou seja, *v* é a derivada de *x* em relação a t. Note também que *v*, em qualquer instante, é a inclinação da curva que representa a posição em função do

tempo no instante considerado. A velocidade instanânea também é uma grandeza

vetorial e, portanto, possui uma direção e um senido.

Velocidade escalar instantânea, ou, simplesmente, velocidade escalar, é o módulo da velocidade, ou seja, a velocidade desprovida de qualquer indicação de direção.

(Atenção: a velocidade escalar e a velocidade escalar média podem ser muito diferentes.) A velocidade escalar de um objeto que está se movendo a uma velocidade de

+5 ***ls*** éa mesma (5 m/s) que ade um objeto que está se movendo a uma velocidade

de -5 ***ls.*** O velocímero do carro indica a velocidade escalar e não a velocidade, já que não mosra a direção e o sentido em que o carro está se movendo.

TESTE 2

As equações a seguir fonecem a posição *x(t)* **de uma partícula em quaro casos (em todas as equações,** *x* **está em meros, tem segundos e *t*** > **0): (1)** *x* **=** ***3t*** **- 2; (2)** *x* **=** ***-4t2*** **- 2; (3)** *x* **= 2/t2; (4)** *x* **= -2. (a) Em que caso(s) a velocidade** *v* **da partícula é constante? (b) Em que caso(s) a velcidade** *v* **é no sentido negativo do eixo** *x?*

Exemplo

Velocidade e inclinação da cuva de *x* em função de : elevador

A Fig. *2-6a* mostra o gráfico *x(t)* de um elevador que, de dicada nos intervalos de 1 s a 3 s e de 8 s a 9 s. Assim, a pois de passar algum tempo parado, começa a se mover Fig. *2-6b* é o gráico pedido. (A Fig. 2-6c será discutida para cima (que tomamos como o senido posiivo de *x)* e na Seção 2-6.)

depois para novamente. Plote v(t).

Dado um gráico de v(t) como a Fig. *2-6b,* poderíamos "retroagir" para determinar a forma do gráfico de *x(t)* **IDEIA-CHAVE**

corespondente (Fig. *2-6a).* Enretanto, não conheceríamos

Podemos determinar a velocidade em qualquer instante os verdadeiros valores de *x* nos vários instantes de temcalculando a inclinação da curva de *x(t)* nesse instante.

po, porque o grico de v(t) contém informações apenas

sobre as *variações* de *x.* Para determinar a variação de *x*

Cálculos A inclinação de *x(t),* e também a velocidade, é em um intervalo dado, devemos, na linguagem do cálculo, zero nos intervalos de O a 1 s e de 9 s em diante, já que o calcular a área "sob a curva" no gráfico de v(t) para esse elevador está parado nesses intervalos. Durante o intervalo intervalo. Assim, por exemplo, durante o intervalo de 3 s *bc,* a inclinação é constante e diferente de zero, o que sig a 8 s, no qual o elevador tem uma velocidade de 4,0 m/s, nifica que o elevador se move com velocidade constante. a variação de *x* é

A inclinação de *x(t)* é dada por

. = (4,0 m/s)(8,0 s - 3,0 s) = +20 m.

(2-6)

.

24 m - 4,0 m

= =

Essa área é posiiva porque a curva *v(t)* está acima do eixo

v

8 0 . 3 0 = +4,0 m/s.

(2-5)

./

' s - ' ' s

t.) A Fig. *2-6a* mostra que *x* realmente aumenta de 20 m

O sinal positivo indica que o elevador está se movendo nesse intervalo. Enretanto, a Fig. *2-6b* nada nos diz sobre no senido posiivo de x. Esses intervalos (nos quais v = os valores de x no início e no inal do intervalo. Para isso, O e v = 4 m/s) estão plotados na Fig. *2-6b.* Além disso, necessitamos de uma informação adicional, como o valor como o elevador começa a se mover a parir do repouso e de x em um dado insante.

depois reduz a velocidade até parar, v varia da forma in-

$$a_{méd} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

19

X

25

***X*= 24 nl**

d

1.x

·-

1

1

[illegible] 10 *X*= 4,0 m**

1

1

5 em *t*= 3,0 s

1

--------- _____ J

.t

o *a*

1 *t*

o

1

2

3 4

5

6 7

curva *v(t) (a = dvldt).* **As iguras na**

parte de baixo dão uma ideia de como

A

A À A O que você sentiria.

um passageiro se sentiria durante as

acelerações.

(e)

2-6 Aceleração

Quando a velocidade de uma parícula varia, diz-se que a parícula sofreu uma aceleração (ou foi acelerada). Para movimentos ao longo de um eixo, a aceleração média a01d em um intervalo de tempo .t é

lv

lt ,

(2-7)

onde a partícula tem uma velocidade v1 no insante ***t1*** e uma velocidade *v**2*** no instante *t**2*•** A aceleração instantânea (ou, simplesmente, aceleração) é dada por

dv

ª = *dt* ·

(2-8)

Em palavras, a aceleração de uma partícula em um dado instante é a taxa com a qual

a velocidade esá variando nesse instante. Graicamente, a aceleração em qualquer

Em palavras, a aceleração de uma partícula em um dado instante é a derivada segunda da posição *x(t)* em relação ao tempo nesse instante.

A unidade de aceleração no SI é o mero por segundo ao quadrado, m/s2. Ouras

unidades são usadas em alguns problemas, mas todas esão na forma de comprimento/tempo2. Da mesma forma que o deslocamento e a velocidade, a aceleração possui um módulo, uma direção e um sentido (ambém é uma grandeza vetorial). O sinal

algébrico representa o sentido em relação a um eixo, ou seja, uma aceleração com

um valor posiivo tem o senido posiivo de um eixo, enquanto uma aceleração com

valor negativo tem o senido negaivo.

A Fig. 2-6 mosra os gráicos da posição, velocidade e aceleração do elevador do

exemplo. Compare a curva de *a(t)* com a curva de *v(t);* cada ponto na curva de *a(t)* corresponde à derivada (inclinação) da curva de *v(t)* no mesmo instante de tempo.

Quando *v* é constante (com o valor de O ou 4 m/s), a derivada é nula e, portanto, a

aceleração é nula. Quando o elevador começa a se mover, a curva de *v(t)* tem derivada posiiva (a inclinação é positiva), o que signiica que *a(t)* é positiva. Quando o elevador reduz a velocidade até parar, a derivada e a inclinação da curva de *v(t)* são negativas, ou seja, *a(t)* é negaiva.

Compare as inclinações da curva de *v(t)* nos dois períodos de aceleração. A inclinação associada à redução de velocidade do elevador (ou seja, à "desaceleração") é maior porque o elvador para na meade do tempo que levou para aingir uma velocidade constante. Uma inclinação maior signiica

que o módulo da desaceleração é maior que o da aceleração, como mosra a Fig. 2-6c.

As sensações que o leitor teria se esivesse no elevador da Fig. 2-6 estão indicadas pelos bonequinhos que aparecem na parte inferior da igura. Quando o elevador acelera, você se sente como se esivesse sendo empurrado para baixo;

mais tarde, quando o elevador reia até parar, tem a impressão de que está sendo

puxado para cima. Entre esses dois intervalos, não sente nada de especial. Em

outras palavras, nosso corpo reage a acelerações (é um acelerômetro), mas não

a velocidades (não é um velocímetro). Quando estamos viajando de carro a 90

km/h ou viajando de avião a 900 km/h, não temos nenhuma sensação de movimento. Entretanto, se o carro ou avião muda bruscamente de velocidade, percebemos imediatamente a mudança e podemos até icar assustados. Boa parte da emoção que sentimos quando andamos de montanha-russa se deve às mudanças

súbitas de velocidade às quais somos submetidos (pagamos pela aceleração, não

pela velocidade). Um exemplo mais exremo aparece nas fotoraias da Fig. 2-7,

iradas enquanto um renó a jato era rapidamente acelerado sobre rilhos e depois

-

reado bruscamente até parar.

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

21

Grandes acelerações são às vezes expressas em unidades *g*, deinidas da seguinte forma: lg = 9,8 m/s**2**

(unidade de g).

(2-10)

(Como vamos discuir na Seção 2-9, ***g*** é o módulo da aceleração de um objeto em

queda live nas proximidades da superfície da Tera.) Uma montanha-russa submete

os passageiros a uma aceleração de até *3g*, o equivalente a (3)(9,8 m/s2) ou cerca de 29 m/s2, um valor mais do que suiciente para jusiicar o peço do passeio.

Na linguagem comum, o sinal de uma aceleração tem um significado não científico: aceleração posiiva significa que a velocidade do objeto esá aumenando e acelera

ção negaiva sinifica que a velocidade está diminuindo (o objeto está desacelerando).

Neste livro, porém, o sinal de uma aceleração indica um senido e não se a velocidade

do objeto esá aumentando ou diminuindo. Assim, por exemplo, se um carro com uma

velocidade inicial ***v*** = -25 m/s é reado até parar em 5,0 s, então aéd = +5,0 m/s2•

A aceleração é *positiva,* mas a velocidade escalar do caro diinuiu. A razão está na

difeença de sinais: o senido da aceleração é conrário ao da velocidade.

A forma apropriada de interpretar os sinais é a seguinte:

Se os sinais da velocidade e da aceleração de uma partícula são iguais, a velocidade

escalar da partícula aumena. Se os sinais são opostos, a velocidade escalar diminui.

TESTE 3

Um marsupial se move ao longo do eixo ***x.*** Qual é o sinal da aceleração do animal se esá se movendo (a) no sentido positivo com velocidade escalar crescente; (b) no sentido positivo com velocidade escalar decrescente; (c) no sentido negativo com velocidade escalar crescente; (d) no sentido negativo com velocidade escalar decrescente?

Exemplo

Aceleração e *v/dt*

A posição de uma parícula no eixo *x* da Fig. 2-1 é dada

IDEIAS-CHAVE

por

(1) Para obter a função velocidade *v(t),* derivamos a função

X = 4 - *27{* + *t3,*

posição *x(t)* em relação ao tempo. (2) Para obter a função

aceleração *a(t)*, derivamos a função velocidade *v(t)* em

com *x* em meros e *tem* segundos.

relação ao tempo.

(a) Como a posição *x* varia com o tempo *t*, a partícula está

em movimento. Determine a unção velocidade *v(t)* e a ***Cálcos*** Derivando a função posição, obtemos função aceleração *a(t)* da partícula.

$\boldsymbol{v} = -27 + 3t\mathbf{2,}$

(Resposta)

com ***v*** em meros por segundo. Derivando a função velo

Em *t* = O, a parícula esá emx(O) = +4 me está se mocidade, obtemos

vendo com velocidade v(O) = -27 m/s, ou seja, no sentido

negaivo do eixo *x.* A aceleração é a(O) = O porque, nesse

a = ***+61,***

(Resposta) instante, a velocidade da parícula não está variando.

com *a* em metros por segundo ao quadrado.

Para O < *t* < 3 s, a parícula ainda possui velocidade

(b) Existe algum instante para o qual *v*

negaiva e, portanto, continua a se mover no sentido ne

= O?

gativo. Enretanto, a aceleração não mais é igual a zero

e sim crescente e positiva. Como os sinais da velocidade

Cálculo Fazendo *v(t)* = O, obtemos

e da aceleração são opostos, o módulo da velocidade da

0 = -27 + 3t**2,**

partícula deve estar diminuindo.

e, portanto,

De fato, já sabemos que a parícula para momentaneamente em t = 3 s. Nesse instante, a partícula se encon

t **= +3 s.**

(Resposta) ra na maior distância à esquerda da origem da Fig. 2-1.

Assim, a velocidade é nula tanto 3 s antes como 3 s após Fazendo t = 3 s na expressão de *x(t),* descobrimos que a o instante ***t***

posição da parícula nesse instante é x

= O.

= -50 m. A aceleração é ainda positiva.

(c) Descreva o movimento da partícula para t > O.

Para t > 3 s, a parícula se move para a direita sobre o

eixo. A aceleração permanece ositiva e aumenta proressi

Raciocínio Precisamos examinar as expressões de *x(t),* vamente em mdulo. A velocidade é agora posiiva e o móv(t) e a(t).

dulo da velocidade ambém aumenta progressivamente. -

2-7 Aceleração Constante: Um Caso Especial

Em muitos ipos de movimento, a aceleração é constante ou aproximadamente constante. Assim, por exemplo, você pode acelerar um carro a uma taxa aproximadamente constante quando a luz de um sinal de trânsito muda de vermelho para verde.

Nesse caso, os ráficos da posição, velocidade e aceleração do caro se assemelhariam aos da Fig. 2-8. [Note que *a(t)* na Fig. 2-8c é constante, o que requer que *v(t)* na Fig. 2-8b tenha uma inclinação constante.] Mais tarde, quando você reia o carro

até parar, a aceleração (ou desaceleração, na linguagem comum) pode ambém ser

aproximadamente constante.

Esses casos são tão requentes que foi formulado um conjunto especial de equa

ções para lidar com eles. Uma forma de obter essas equações é apresentada nesta

seção; uma segunda forma será apresentada na seção seguinte. Nessas duas seções e

mais tarde, quando você rabalhar na solução dos problemas, lembre-se de que *essas*

*soluções são válidas apenas quando a aceleração **é** constante (ou em situações nas*

quais a aceleração pode ser consideada apoximaamente consante).

Quando a aceleração é constante, a aceleração média e a aceleração instantânea são iguais e podemos escrever a Eq. 2-7, com algumas mudanças de notação, na forma

V - *V*

a -- *a* md --

o

I - o ·

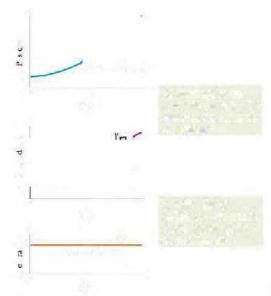
onde $v0$ é a velocidade no instante t = O e v é a velocidade em um instante de tempo posterior t. Explicitando v, temos:

$v = v\ 0 + at.$

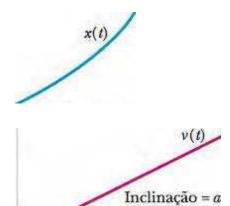
(2-1 1)

Como veriicação, note que esta equação se reduz a $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v0}$ para t = O, como era de se esperar. Como verificação adicional, vamos calcular a derivada da Eq. 2-1 1. Oresultado é $dv/dt = a$, o que coresponde à demição de a. A Fig. 2-8b mostra o gráfico da Eq. 2-11, a função v(t); a função é linear e, poranto, o ráfico é uma linha reta.

De maneira análoga, podemos escrever a Eq. 2-2 (com algumas mudanças de

notação) na forma

$$x = x_0 + v_{méd}t,$$

$$v_{méd} = \frac{1}{2}(v_0 + v).$$

$$x - x_0 = v_0t + \frac{1}{2}at^2.$$

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

23

X - To

[illegible] = *t* - Q

o que nos dá

(2-12)

onde o é a posição da parícula em *t* = O e vmd é a velocidade média entre *t* = O e um instante de tempo posterior *t.*

Para a função velocidade linear da Eq. 2-11, a velocidade *média* em qualquer intervalo de tempo (de *t* = O a um instante posterior *t*, digamos) é a média aritmética da velocidade no início do intervalo (***v0)*** com a velocidade no

final do intervalo (*v*). Para o intervalo de *t* = O até um insante posterior *t,* portanto, a velocidade média é (2-13)

Substituindo *v* pelo seu valor, dado pela Eq. 2-11, obtemos, agrupando os termos,

vm&I = *Vo* + f *ar.*

(2-14)

Finalmente, subsituindo a Eq. 2-14 na Eq. 2-12, obtemos:

(2-15)

Como verificação, note que esta equação se reduz a *x* = o para *t* = O, como era de se esperar. Como verificação adicional, vamos calcular a derivada da Eq. 2-15. O

resultado é a Eq. 2-11, como era de se esperar. A Fig. 2-8a mosra o gráico da Eq.

2-15; como a função é do segundo grau, o gráfico não é uma linha reta.

As Eqs. 2-11 e 2-15 são as *equações básicas do movimento com aceleração*

constante; podem ser usadas para resolver qualquer problema deste livro que envolva uma aceleração constante. Enretanto, é possível deduzir outras equações que podem ser úteis em situações especíicas. Observe que um problema com acelera

ção constante pode envolver até cinco grandezas: $x - x_0$, *v, t, a* e v_0• Nomalmente, uma dessas grandezas *não está envolvida no poblema, nem como ddo, nem como*

incógnita. São fonecidas rês das grandezas resantes e o problema consiste em determinar a quarta.

X

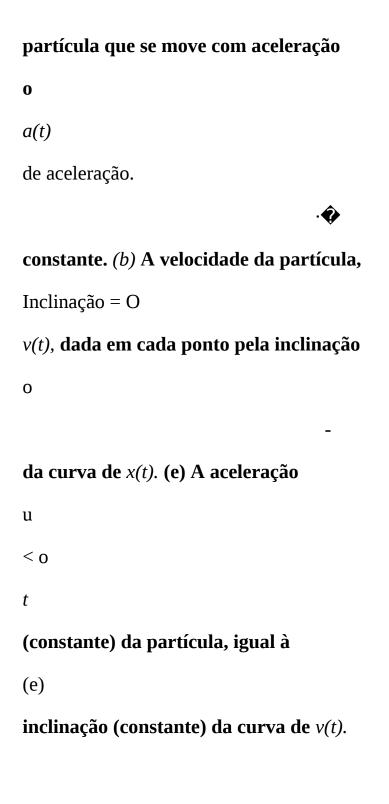
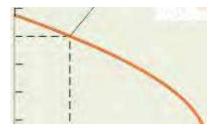



Tabela 2-1

As Eqs. 2-11 e 2-15 contêm, cada uma, quaro dessas grandezas, mas não as mes

Equações do Movimento com

mas quaro. Na Eq. 2-11, a grandeza ausente é o deslocamento *x - 0;* na Eq. 2-15, **Aceleração Constante•**

é a velocidade *v.* As duas equações também podem ser combinadas de rês maneiras

Número da

Grandeza diferentes para produzir rês novas equações, cada uma das quais envolvendo quaro **Equação**

Equação

que falta grandezas diferentes. Em primeiro lugar, podemos eliminar *t* para obter 2-11

v = v0 [illegible] nt

2-15 para obter uma equação em que *a* não aparece:

o = VI - !at 2

•Ceriique-se de que a aceleração é consante

x **-** x**0 =** 4(1**0 +** *v)t.*

(2-17)

antes de usar as equaçes desta tabela.

Finalmente, podemos eliminar *v0,* obtendo

X - Xn = ***Vf - !at2.***

(2-18)

Note a diferença sutil entre esta equação e a Eq. 2-15. Uma envolve a velocidade

inicial v0; a outra envolve a velocidade *v* no instante *t.*

A Tabela 2-1 mosra as equações básicas do movimento com aceleração constante

(Eqs. 2-11 e 2-15), assim como as equações especiais que deduzimos. Para resolver

um problema simples envolvendo aceleração constante, em geral é possível usar

uma equação da lista *(se* você puder consultar a lista). Escolha uma equação para a

qual a única variável desconhecida é a variável pedida no problema. Um plano mais

simples é memorizar apenas as Eqs. 2-11 e 2-15 e montar com elas um sistema de

-

.

.

, .

equaçoes, caso isso seJa necessano.

-TESTE 4

As equações a seguir fornecem a posição *x(t)* de uma partícula em quaro casos: (1) *x* =

3t - 4; (2) x **= -5t**3 + *4t***2** + **6; (3)** x **=** *1t2* **-** *4ft;* **(4)** x **=** *5t2* **- 3. Em que caso(s) as equações da Tabela 2-1 podem ser aplicadas?**

Exemplo

Aceleração constante: gráfico de vem função de *x*

A Fig. 2-9 mostra a velocidade v de uma parícula em fun

[illegible] -A velocidade é 8 m/s

ção da posição enquanto a parícula se move ao longo do

quando a posição é 20 m.

eixo x com aceleração constante. Qual é a velocidade da

parícula no ponto x

8

= O?

IDEIA-CHAVE

Podemos usar as equações de aceleração constante; em

[illegible] A velocidade é O

paricular, podemos usar aEq. 2-16 [v**2 =** *V6* + *2a(x* - *x*

quando a posição

0)]

20

70

que relaciona a velocidade à posição.

é 70 m.

X **(m)**

Figura 2-9 Velocidade de uma partícula em função da

Primeira tentaia Normalmente, estamos interessados **posição .**

em usar uma equação que contenha a variável pedida. Na

Eq. 2-16, podemos dizer que *x0* = O e que *v0* é a variável

pedida. Para determinar o valor de ***Vo,*** precisamos conhe Entretanto, não podemos usar a Eq. 2-19 para calcular o cer os valores de *v* e x no mesmo ponto. O gráico permite valor de v

determinar dois pares de valores para *v* e x: (1) *v* = 8 m/s

0, já que não conhecemos o valor de *a*.

e x = 20 m; (2) *v* = O ex = 70 m. Usando o primeiro par, ***Segunda tentaia*** Em vez de tentarmos determinar direpodemos escrever: tamente a variável pedida, vamos aplicar a Eq. 2-16 aos

$(8 \text{ m/s})2 = [illegible] + 2a(20 m - O).

(2-19) dois pontos conhecidos, chamando de v =

=

0

8 m/s e $x0$

$$\int dv = \int a\, dt.$$

$$\int dv = a \int dt$$

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

25

20 m o primeiro par de valores e de *v* = O m/s ex = 70 m aqueles que exigem o uso de uma equação que *não* inclui o segundo par. Nesse caso, podemos escrever:

a variável pedida, mas fornee um valor necessário para

(O m/s)**2** = (8 n1/s)2 + 2a(70 n1 - 20 m),

determiná-Ia Às vezes, esse tipo de abordagem exige *coragem*, pois se trata de uma solução indireta. Enretanto, o que nos dá *a* = -0,64 m/s**2•** Subsituindo este valor na se o leitor aprimorar sua técnica resolvendo muitos ipos Eq. 2-19 e explicitando *v****0*** (a velocidade associada à posi de problemas, esse ipo de abordagem exigirá uma dose ção x = O), obtemos

cada vez menor de coragem e poderá até mesmo tornar

v

se óbvio. A solução de qualquer problema, seja físico ou

0 = 9,5 1n/s.

(Resposta) social, requer uma certa dose de práica.

Comentáio Alguns problemas envolvem uma equação que

inclui a variável pedida. Os problemas mais diíceis são

2-8 Mais sobre Aceleração Constante*

As duas primeiras equações da Tabela 2-1 são as equações básicas a partir das quais

as outras podem ser deduzidas. Essas duas equações podem ser obtidas por interação da aceleração com a condição de que a seja uma constante. Para obter a Eq.

2-11, escrevemos a definição de aceleração (Eq. 2-8) na forma

dv = *a dt.*

Em seguida, escrevemos a *integral indefinida* (ou *antiderivada)* nos dois lados da equação:

Como a aceleração *a* é constante, pode ser colocada do lado de fora do sinal de integração. Nesse caso, temos: ou

V = *at* + C.

(2-20)

Para determinar a constante de integração C, fazemos *t* = O, instante no qual *v* =

*v**0*** • Substiuindo esses valores na Eq. 2-20 (que é válida para qualquer valor de *t*, incluindo *t* = 0), obtemos *Vo* = (a)(O) + e = e.

Substituindo este valor na Eq. 2-20, obtemos a Eq. 2-11.

Para demonsrar a Eq. 2-15, escrevemos a deinição de velocidade (Eq. 2-4) na

forma

dx = V *dL*

e integramos ambos os membros desta equação para obter

Jdx = J V dt.

Substituindo *v* pelo seu valor, dado pela Eq. 2-11, temos:

J dx = *Jcv*º + a,) dt.

* Esta seão se destina a alunos que conhecem cálculo interal.

Como v0 e *a* são constantes, podemos escrever

f dx = vf 0 dt **+** *a f t dt.*

Integrando, obtemos

*x = v-**1***

[illegible] + *!*

2 *at**2*** [illegible] C' '

(2-21)

onde C' é oura constante de integração. No instante *t* = O, temos ***x*** = ***x0*•** Subsituindo esses valores na Eq. 2-21, obtemos ***x0*** = C'. Subsituindo C' por ***x0*** na Eq. 2-21, obtemos a Eq. 2-15.

2-9 Aceleração em Queda Livre

Se o leitor arremessasse um objeto para cima ou para baixo e pudesse de alguma forma

eliminar o efeito do ar sobre o movimento, observaia que o ojeto sore uma acelera

ção constante para baixo, conhecida como **aeleraão em queda livre,** cujo módulo

é representado pela lera *g*. O valor dessa aceleração não depende das características

do objeto, como massa, densidade e forma; é a mesma para todos os objetos.

A Fig. 2-10 mosra dois exemplos de aceleração em queda livre aravés de uma

série de fotos esroboscópicas de uma pena e de uma maçã. Enquanto esses objetos

caem, sorem uma aceleração para baixo, que nos dois casos é igual a *g*. Assim, suas

velocidades aumentam com a mesma taxa e eles caem juntos.

O valor de *g* varia ligeiramente com a laitude e com a altitude. Ao nível do mar

e em laitudes médias, o valor é 9,8 /s2, que é o valor que o leitor deve usar como

número exato nos problemas deste livro, a menos que seja dito o conrário.

As equações de movimento da Tabela 2-1 para aceleração consante também se

aplicam à queda livre nas proximidades da supefície da Tera, ou seja, se plicam a um

objeto que esteja descrevendo uma rajetória veical, para cima ou para baixo, contanto

que os efeitos do ar possam ser desprezados. Observe, porém, que, no caso da queda

livre, (1) a direção do movimento é ao longo de um eixo *y* verical e não ao longo de

um eixo ***x*** horizontal, com o senido posiivo de *y* apontando para cima (isto será importante em capítulos subsequentes, em que examinaremos movimentos simultâneos nas direções hoizontal e verical); (2) a aceleração em queda livre é negativa, ou seja,

para baixo, em direção ao cenro da Terra, e, portanto, tem o valor *g* nas equações.

A aceleração em queda livre nas proximidades da superície da Terra **é *a*** = ***-g*** =

-9,8 m/s2 e o *módulo* da aceleração **é** *g* = 9,8 m/s2• Não substitua *g* por -9,8 m/s2 (e sim por 9,8 m/s2).

Suponha que você arremesse um tomate vericalmente para cima com uma velocidade inicial (posiiva) *v0* e o apanhe quando volta ao nível inicial. Durante a *trajetória em queda livre* (do instante imediatamente após o lançamento ao instante imediatamente antes de ser apanhado), as equações da Tabela 2-1 se aplicam ao movimento do tomate. A aceleração é sempre *a = -g* = -9,8 /s2, negativa e, poranto, dirigida

para baixo. A velocidade, enretanto, varia, como mosram as Eqs. 2-11 e 2-16: na

subida, a velocidade é positiva e o módulo diminui até se tomar momentaneamente

igual a zero. Nesse instante, o tomate ainge a altura máxima. Na descida, o módulo

da velocidade (agora negaiva) cresce.

Figua 2-1 O Uma pena e uma maçã

[illegible] 5**

em queda livre no vácuo sofrem a

(a) Se você arremessa uma bola verticalmente para cima, qual **é** o sinal do deslocamento

mesma aceleração ***g*,** que aumenta a

da bola durante a subida, desde o ponto inicial até o ponto mais alto da trajetória? (b) Qual

distância entre imagens sucessivas. Na

é o sinal do deslocamento durante a descida, desde o ponto mais alto da rajetória até o ausência de ar, a pena e a maçã caem

ponto inicial? (c) Qual **é** a aceleração da bola no ponto mais alto da trajetória?

juntas. *(Jim Sugar!Corbis Images)*

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

27

Exemplo

Tempo de percurso de uma bola de beisebol lançada veticalmente

Na Fig. 2-11, um lançador arremessa uma bola de beisebol ***Cálculo*** Como conhecemos *v, a* e a velocidade inicial para cima ao longo do eixo *y,* com uma velocidade inicial v0 = 12 m/s e estamos interessados em determinar o valor de 12 m/s.

- de *t*, escolhemos a Eq. 2-11, que contém essas quatro va

(a) Quanto tempo a bola leva para atingir a altura máxi riáveis. Explicitando *t,* obtemos: ma?

v - *v****0***

O - 12 m/s

t =

9 8 2 = 1.2 s.

(Resposta)

a

- , m/s

I D EIAS-CHAVE

(b) Qual é a altura máxima alcançada pela bola em relação

(1) Enre o instante em que a bola é lançada e o instan ao ponto de lançamento?

te em que volta ao ponto de partida, sua aceleração é a

aceleração em queda livre, *a* = - *g*. Como a aceleração é ***Cálculo*** Podemos tomar o ponto de lançamento da bola constante, podemos usar as equações da Tabela 2-1. (2) como y

A velocidade *v* no instante em que a bola atinge a altura

0 = O. Nesse caso, podemos escrever a Eq. 2-16

com *y* no lugar de *x*, fazer *y* - *y*

máxima é

0 = *y* e *v* = O (na altura

O.

máxima) e explicitar *y*. O resultado é

v2 - v *2*

O -

O

(12 m/s)2

=

Bola

Y = 2a

2(_9

1 1

negaiva

1

na forma

1

1 1

y= *o*

4,9/**2 -** 121 + 5,0 = o.

Resolvendo esta equação do segundo rau, obtemos

L = 0,53 s e ***t*** = 1,9 s.

(Resposta)

Figura 2-1 1 Um lançador arremessa uma bola de beisebol

Existem dois tempos possíveis! Isso na verdade não chega

para cima. As equações de queda livre se aplicam tanto a

a ser uma surpresa, pois a bola passa duas vezes pelo ponto

objetos que esão subindo como a objetos que estão caindo,

y = 5,0 m, uma vez na subida e outra na descida.

desde que a inluência do ar possa ser desprezada.

2-1 O Integração de Gráficos em Análise de Movimento

Quando temos o gráico da aceleração de um objeto em função do tempo, podemos

integrar o grico para obter a velocidade do objeto em qualquer instante dado. Como

a aceleração *a* é deinida em termos da velocidade como $a = dv/dt$, o Teorema Fundamental do Cálculo nos diz que *('*•

v*1* - ***v*****0 =** J, ***a*** *dt.*

(2-22)

O lado direito desta equação é uma integral definida (fonece um resultado numérico em vez de uma função), v_0 é a velocidade no instante t_0 e v_1 é a velocidade em

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

27

Exemplo

Tempo de percurso de uma bola de beisebol lançada veticalmente

Na Fig. 2-11, um lançador arremessa uma bola de beisebol ***Cálculo*** Como conhecemos *v, a* e a velocidade inicial para cima ao longo do eixo *y,* com uma velocidade inicial v0 = 12 m/s e estamos interessados em determinar o valor de 12 m/s.

- de *t*, escolhemos a Eq. 2-11, que contém essas quatro va

(a) Quanto tempo a bola leva para atingir a altura máxi riáveis. Explicitando *t,* obtemos: ma?

v - *v****0***

O - 12 m/s

t =

9 8 2 = 1.2 s.

(Resposta)

a

- , m/s

I D EIAS-CHAVE

(b) Qual é a altura máxima alcançada pela bola em relação

(1) Enre o instante em que a bola é lançada e o instan ao ponto de lançamento?

te em que volta ao ponto de partida, sua aceleração é a

aceleração em queda livre, *a* = - *g*. Como a aceleração é ***Cálculo*** Podemos tomar o ponto de lançamento da bola constante, podemos usar as equações da Tabela 2-1. (2) como y

A velocidade *v* no instante em que a bola atinge a altura

0 = O. Nesse caso, podemos escrever a Eq. 2-16

com *y* no lugar de *x*, fazer *y* - *y*

máxima é

0 = *y* e *v* = O (na altura

O.

máxima) e explicitar *y*. O resultado é

v2 - v *2*

O -

O

(12 m/s)2

=

Bola

Y = 2a

2(_9

1 1

negaiva

1

na forma

1

1 1

y= *o*

4,9/**2 -** 121 + 5,0 = o.

Resolvendo esta equação do segundo rau, obtemos

L = 0,53 s e ***t*** = 1,9 s.

(Resposta)

Figura 2-1 1 Um lançador arremessa uma bola de beisebol

Existem dois tempos possíveis! Isso na verdade não chega

para cima. As equações de queda livre se aplicam tanto a

a ser uma surpresa, pois a bola passa duas vezes pelo ponto

objetos que esão subindo como a objetos que estão caindo,

y = 5,0 m, uma vez na subida e outra na descida.

desde que a inluência do ar possa ser desprezada.

2-1 O Integração de Gráficos em Análise de Movimento

Quando temos o gráico da aceleração de um objeto em função do tempo, podemos

integrar o grico para obter a velocidade do objeto em qualquer instante dado. Como

a aceleração a é deinida em termos da velocidade como $a = dv/dt$, o Teorema Fundamental do Cálculo nos diz que *('*•

***v**1* - ***v*0 =** J, ***a** dt.*

(2-22)

O lado direito desta equação é uma integral definida (fonece um resultado numérico em vez de uma função), v_0 é a velocidade no instante t_0 e v_1 é a velocidade em

um instante posterior t1• A integral deinida pode ser calculada a parir do gráico de

a(t), como na Fig. 2-12a. Em paricular,

('• a *dt* = (área [illegible] a cw·va de aceleração).

J,..

e o e, xo dos tempos, de

(2-23)

10 a 11

Se a unidade de aceleração é 1 m/s2 e a unidade de tempo é 1 s, a unidade de

área no gráico é

(1 m/s**2**)(1 s) = 1 m/s,

que é (como devia ser) uma unidade de velocidade. Quando a curva da aceleração

está acima do eixo do tempo, a área é positiva; quando a curva está abaixo do eixo

e o eixo dos tempos, do instante t0 **ao**

(1 m/s}(l s) = 1 m,

instante t1, **indicada** *(a)* **em um gráfico**

da aceleração *a* **em função do tempo** ***t*** **e**

que é (como devia ser) uma unidade de posição e deslocamento. A questão de essa

(b) **em um gráico da velocidade v em**

área sr posiiva ou negaiva é determinada da mesma forma que para a curva *a(t)*

função do tempo ***t.***

da Fig. 2-12a.

Exemplo

Integração do gráfico a em função de r. lesões no pescoço

Lesões no pescoço causadas pelo "efeito chicote" são cabeça sofreu um reardo de mais 70 ms. Qual era a vefrequentes em colisões raseiras, em que um automóvel é locidade do ronco quando a cabeça começou a acelerar?

ainido por rás por ouro automóvel. Na década de 1970,

os pesquisadores concluíram que a lesão ocorria porque a

cabeça do ocupante era jogada para rás por cima do banco

IDEIA-CHAVE

quando o carro era empurrado para frente. A parir dessa Podemos determinar a velocidade escalar do tronco em observação, foram instalados encostos de cabeça nos car qualquer instante calculando a área sob a curva da aceleros, mas as lesões de pescoço nas colisões raseiras coni ração do tronco, *a(t).*

nuaram a acontecer.

Em um teste recente para estudar as lesões do pescoço ***álculos*** Sabemos que a velocidade inicial do ronco é em colisões raseiras, um voluntário foi preso por cintos a v

=

0 = O no instante *t0*

O, ou seja, no início da "colisão".

um assento, que foi movimentado bruscamente para simu Queremos obter a velocidade do ronco v1 no instante t1 =

lar uma colisão na qual o carro de trás esava se movendo 110 ms, ou seja, quando a cabeça começa a acelerar.

a 10,5 h. A Fig. 2-13a mostra a aceleração do ronco e

Combinando as Eqs. 2-22 e 2-23, podemos escrever:

da cabeça do voluntário durante a colisão, que começa no

instante ***t*** = O. O início da aceleração do ronco sofreu um

_ (área entre a curva de aceleração)

v, - vo - e o eixo dos tempos, de

•

(2-26)

retardo de 40 ms, tempo que o encosto do as sento levou

t0 a t1

para ser comprimido conra o voluntário. A aceleração da Por conveniência, vamos separar a área em três regiões

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

(Fig. 2-13b). De O a 40 ms, a região ***A*** tem área nula:

Subsituindo esses valores e fazendo v**0 =** O na Eq. 2-26,

área

obtemos:

11 = O.

v

De 40 ms a 100 ms, a região ***B*** tem a forma de um riân

1 - O **=** O + 1,5 m/s + 0,50 m/s,

gulo cuja área é

ou

v 1 = 2,0 1n/s = 7.2 kn1/h.

(Resposta)

área n = {(0,060 s)(50 m/s2) = 1,5 n/s.

Comentáios Quando a cabeça está começando a se mover

para a rente, o tronco já tem uma velocidade de 7 ,2 km/h.

De 100 ms a 11 O ms, a região C tem a forma de um retân Os pesquisadores afirmam que é esta diferença de velocigulo cuja área é dades nos primeiros instantes de uma colisão raseira que

árcac **=** (0,010 s)(50 m/s2) = 0.50 mls.

causa lesões do pescoço. O movimento brusco da cabeça

para rás acontece depois e pode agravar a lesão, especialmente se não exisir um encosto para a cabeça.

a partícula estiver exatamente na origem). O sentido posiivo grandeza vetorial). A **velocidade média não depende da distância que de um eixo é o sentido em que os números que indicam a posi uma parícula percore, mas apenas das posições inicial e inal.**

ção da partícula aumentam de valor; o sentido oposto é o senido

Em um grico de *x* em função de *t*, a velocidade média em

negaivo.

um intervalo de tempo .*t* é iual à inclinação da linha reta que

une os pontos da curva que representam as duas exremidades do

intervalo.

Deslocamento O *deslocamento* **x de uma partícula é a varia**

ção da posição da partícula:

Velocidade Esalar Média A *velocidade escalar média* sméd **de**

(2-1) **uma partícula durante um intervalo de tempo .*t* depende da distân**

,

cia total percorrida pela partícula nesse intervalo:

O deslocamento é uma grandeza vetorial. E positivo se a parícula

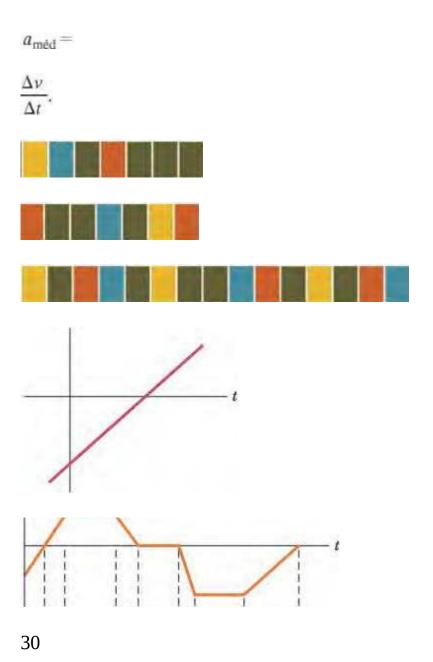
se desloca no sentido posiivo do eixo *x* e negativo se a partícula se

distância total

desloca no senido oposto.

sd =

(2-3)

$$a_{méd} = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

onde 6x e .*t* são definidos pela Eq. 2-2. A velocidade instantânea Aeleração Constante As cinco equações da Tabela 2-1 des

(em um certo instante de tempo) é igual à inclinação (nesse mesmo crevem o movimento de uma partícula com aceleração constante: instante) do gráfico de *x* em função de *t.* A velocidade escalar é o módulo da velocidade instanânea.

v = v0 + at,

(2-11)

X - X(> = 1if + ***ia****/2,*

(2-15)

Aceleração Média A *aceleração média* **é a razão enre a variação de velocidade** . *v* **e o intervalo de tempo** .*t* **no qual essa** *v****2*** *= [illegible] + *2a(x* - x0).

(2-16)

variação ocorre:

*x - x0 = !(v***0** *+ v)t,*

(2-17)

(2-7)

***X - Xo = VI - [illegible]

(2-18)

Essas equações *não são válias* **quando a aceleração não é cons**

O sinal algébrico indica o sentido de amd·

tante .

Aceleração Instantânea A *aceleração instantânea* **(ou sim Aceleração em Queda Livre Um exemplo importante de moviplesmente aceleração)** ***a*** **é igual à derivada primeira em relação ao mento retilíneo com aceleração constante é o de um objeto subindo tempo da velocidade** *v(t)* **ou à derivada segunda da posição** *x(t)* **em ou caindo livremente nas proximidades da superfície da Terra. As relação ao tempo:**

equações para aceleração constante podem ser usadas para descredv

d2x

ver o movimento, mas é preciso fazer duas mudanças na notação:

^{a} ***= t = dt2***

(2-8,2-9) (1) o movimento deve ser descrito em relação a um eixo vertical *y,*

•

com +*y* orienado verticalmente *para cima;* (2) a aceleração *a* deve Em um gráico de vem função de *t,* a aceleração *a* em qualquer ins ser substiuída por - *g,* onde *g* é o módulo da aceleração em queda tante *t* é iual à inclinação da curva no ponto que representa *t.*

livre. Perto da superfície da Tera, *g* = 9,8 m/s2•

P E R G U N T A S

1 A Fig. 2-14 mosra a velocidade de uma partícula que se move loque as trajetórias (a) na ordem da velocidade média dos objetos e em um eixo *x.* Determine (a) o sentido inicial e (b) o sentido fnal (b) na ordem da velocidade escalar média dos objetos, começando do movimento. (c) A velocidade da partícula se anula em algum pela maior.

instante? (d) A aceleração é positiva ou negativa? (e) A aceleração

é constante ou variável?

1

V

2

3

•

Figura 2-16 Pergunta 3.

4 A Fig. 2-17 é um gráfico da posição de uma partícula em um eixo

Figura 2-14 Pergunta 1.

***x* em unção do tempo. (a) Qual é o sinal da posição da partícula**

no instante *t* = O? A velocidade da partícula é positiva, negativa

2 A Fig. 2-15 mosra a aceleração *a(t)* de um chihuahua que per ou nula(b) em *t* = 1 s, (c)emt = 2 s e (d) em *t* = 3 s? (e) Quantas seue um pastor alemão sobre um eixo. Em qual dos períodos de vezes a partícula passa pelo ponto *x* = O?

tempo indicados o chihuahua se move com velocidade constante?

X

a

[illegible]

1

1

/ \

o *I*

***t* (s)**

\

I

'

.

A IB I e IDI *E* IFI *e*

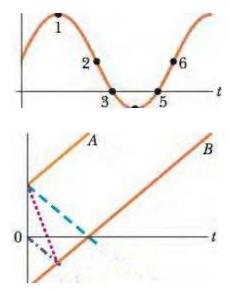
H

-

Figura 2-17 Pergunta 4.

Figura 2-15 Pergunta 2.

5 A Fig. 2-18 mosra a velocidade de uma partícula que se move

3 A Fig. 2-16 mostra as trajetórias de quaro objetos de um ponto em um eixo. O ponto 1 é o ponto mais alto da curva; o ponto 4 é inicial a um ponto final, todas no mesmo intervalo de tempo. As o ponto mais baixo; os pontos 2 e 6 estão na mesma altura. Qual é trajetórias passam por rês linhas retas iualmente espaçadas. Co-o sentido do movimento (a) no instante *t* = O e (b) no ponto 4? (c)

PROBLEMAS

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

31

Em qual dos seis pontos numerados a partícula inverte o sentido de 8 As equações a seguir fonecem a velocidade *v(t)* de uma partímovimento? (d) Coloque os seis pontos na ordem do módulo da cula em quatro situações: (a) *v* = 3; (b) *v* = *4t2* + *2t* -6; (c) *v* =

aceleração, começando pelo maior.

3t -4; (d) *v* = *5t2* - 3. Em que situações as equações da Tabela 2-1 podem ser aplicadas?

V

9 Na Fig. 2-20, uma tangerina é lançada verticalmente para cima

e passa por três janelas igualmente espaçadas e de alturas iguais.

Coloque as janelas na ordem decrescente (a) da velocidade escalar

média da tangerina ao passar por elas, (b) do tempo que a tangerina

Figura 2-18 Pergunta 5.

leva para passar por elas, (c) do módulo de aceleração da tangeri4

na ao passar por elas e (d) da variação [illegible] da velocidade escalar da

6 No instante *t* = O, uma partícula que se move em um eixo *x* está tangerina ao passar por elas.

na posição *x0* = -20 m. Os sinais da velocidade inicial v0 (no instante *t0)* e da aceleração consante *a* da parícula são, respectivamente, para quatro situações: (1) +, +; (2) +, -; (3) -, +; (4) -, -. Em

que siuações a partícula (a) para momentaneamente, (b) passa pela

1

origem e (c) não passa pela origem?

7 Debruçado no parapeito de uma

t

1

V

1

ponte, você deixa cair um ovo (com

1 1

velocidade inicial nula) e atira um

1

segundo ovo para baixo. Qual das

'

Figura 2-20 Pergunta 9.

Figura 2-19 Pergunta 7.

'G '

.

F

' 'E

'

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponívei s em O *Circo Voador da Física* de Jeart Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 2-4 Velocidade Média e Velocidade Escalar

•5 A posição de um objeto que se move ao longo de um eixo *x* é

Média

dada por $x = 3t - 4t2 + t3$, onde *x* está em metros e tem segundos.

•1 Durante um espirro, os olhos podem se fechar por até 0,50 s. Se Determine a posição do objeto para os seguintes valores de *t:* (a) 1

você está dirigindo um caro a 90 km/h e espirra, de quanto o caro s, (b) 2 s, (c) 3 s, (d) 4 s. (e) Qual é o deslocamento do objeto enre pode se deslocar até você abrir novamente os olhos?

t = O e t = 4 s? () Qual é a velocidade média para o intervalo de

tempo de t = 2 s a t = 4 s? (g) Desenhe o gráfico de *x* em função

•2 Calcule a velocidade média nos dois casos seguintes: (a) você de *t* para O *5 t 5* 4 s e indique como a resposta do item () pode ser caminha 73,2 m a uma velocidade de 1,22 m/s e depois corre 73,2 determinada a partir do gráfico.

m a m/s em uma pista rea; (b) você caminha 1,00 min com uma

velocidade de 1,22 m/s e depois corre por 1,00 min a 3,05 m/s em •6 Em 1992, um recorde mundial de velocidade em uma bicicleuma pista reta. (c) Faça o gráico de *x* em função de ta foi estabelecido por Chris Huber. O tempo para percorrer um

t nos dois casos

e indique de que forma a velocidade média pode ser determinada a trecho de 200 m foi apenas 6,509 s, ao inal do qual Chris comenpartir do gráico.

tou: "Cogito ergo zoom!" (Penso, logo corro!). Em 2001, Sam

Whittingham quebrou o recorde de Huber por 19 km/h. Qual foi

•3 Um automóvel viaja em uma estrada retinea por 40 m a 30 o tempo gasto por Whittingham para percorrer os 200 m?

km/h. Em seguida, coninuando no mesmo senido, percorre outros

40 km a 60 *h. (a) Qual é a velocidade média do carro durante ••7 Dois trens, ambos se movendo com uma velocidade de 30 m*h, este percurso de 80 km? (Suponha que o carro está se movendo no trafegam em sentidos opostos na mesma linha férrea reilínea. Um sentido positivo de

pássaro parte da exremidade dianteira de um dos rens, quando es

x.) (b) Qual é a velocidade escalar média? (c)

Desenhe o gráico de *x* em função de

tão separados por 60 km, voando a 60 km/h, e se dirige em linha

t **e mosre como calcular a**

velocidade média a partir do ráico.

reta para o outro rem. Ao chegar ao ouro trem, o pássaro faz meia

vola e se dirige para o primeiro rem, e assim por diante. (Não t e

•4 Um carro sobe uma ladeira com uma velocidade constante de 40 mos a menor ideia do ***motivo*** **pelo qual o pássaro se comporta desta**

h e desce a ladeira com uma velocidade constante de 60 m**h. forma.) Qual é a distância que o pássaro percorre até os rens coli**

Calcule a velocidade escalar média da viagem de ida e vola.

direm?

••8 -

Situação de pânico **A Fig. 2-21 mostra uma siuação na**

-L* •I• *d* --*L* •I • *d* - -*L* •I • *L* [illegible] *L1

qual muitas pessoas tentam escapar por uma porta de emergência

que está trancada. As pessoas se aproximam da porta com uma ve

-->

**r13-\GFJ_ [illegible]

locidade v, = 3,50 m/s, têm *d* = 0,25 m de espessura e esão sepa

V

**Carro Distância [illegible]

radas por uma distância *L* = 1,75 m. A Fig. 2-21 mostra a posição

das pessoas no instante *t* = O. (a) Qual é a taxa média de aumento
Figura 2-22 Problema 12.

da camada de pessoas que se comprimem contra a porta? (b) Em

que insnte a espessura da camada chega a 5,0 m? (As respostas •••13 Você dirige do Rio a São Paulo metade *do tempo* a *55* km/h mosram com que rapidez uma situação deste tipo pode colocar em e a outra metade a 90 m/h. Na volta, você viaja metade *da dis*

risco a vida das pessoas.)

***tância* a 55 km/h e a outra metade a 90 m/h. Qual é a velocidade**

escalar média (a) na viagem do Rio a São Paulo, (b) na viagem de

São Paulo ao Rio, e (c) na viagem inteira? (d) Qual é a velocidade

média na viagem inteira? (e) Plote o gráico de x em função de t para o item (a), supondo que o movimento ocorre no sentido positivo de

x. Mostre de que forma a velocidade média pode ser determinada

Porta

a partir do gráico.

trancada

Seção 2-5 Velocidade Instantânea e Velocidade

Figura 2-21 Problema 8.

Escalar

• •9 Em uma corrida de 1 km, o corredor 1 da raia 1 (com o tempo • 14 A posição de um eléron que se move ao longo do eixo x é de 2 in, 27,95 s) parece ser mais rápido que o coredor 2 da raia dada por x = 16re-' m, onde testá em segundos. A que distância da 2 (2 min, 28,15 s). Entretanto, o comprimento Li da raia 2 pode ser origem se encontra o eléron quando para momentaneamente?

ligeiramente maior que o comprimento Li da raia 1. Qual é o maior •15 (a) Se a posição de uma parícula é dada por *x* = 4 -12t +

valor da diferença L *2* - Li para o qual a conclusão de que o corredor 3t2 (onde t está em segundos e x em metros), qual é a velocidade 1 é mais rápido é verdadeira?

da partícula em *t* = 1 s? (b) O movimento nesse instante é no sen

• • 1 O

-Para estabelecer um recorde de velocidade em uma tido posiivo ou negativo de *x?* (c) Qual é a velocidade escalar da distância *d* (em linha reta), um carro deve percorrer a distância partícula nesse instante? (d) A velocidade escalar está aumentando primeiro em um sentido (em um tempo t

ou diminuindo nesse insnte? (Tente responder às duas próximas

1) e depois no sentido

oposto (em um tempo t

pergunas sem fazer ouros cálculos.) (e) Existe algum instante no

2). (a) Para eliminar o efeito do vento e

obter a velocidade do carro v

qual a velocidade se anula? Caso a resposta seja airmativa, para

c na ausência de vento, devemos

calcular a média arimética de *d/t*

que valor de *t* isso acontece? () Existe algum instante após *t* = 3 s

***i* e *d/t2* (método 1) ou devemos**

dividir *d* pela média aritmética de *t*

no qual a partícula está se movendo no sentido negativo de *x?* Caso

***i* e *t2?* (b) Qual é a diferença**

percentual dos dois métodos se existe um vento constante na pista a resposa seja airmativa, para que valor de *t* isso acontece?

e a razão entre a velocidade *v v* do vento e a velocidade *ve do* carro • 16 A função posição *x(t)* de uma partícula que está se movendo é 0,0240?

ao longo do eixo *x* é *x* = 4,0 - *6,0t2,* com *x* em metros e t em s e

••1 1 Você tem que dirigir em uma via expressa para se candida gundos . (a) Em que instante e (b) em que posição a partícula para tar a um emprego em outra cidade, que ica a 300 km de disância. (momentaneamente)? Em que (c) insante negativo e (d) instante A enrevista foi marcada para as 1 lh15min. Você planeja dirigir a positivo a partícula passa pela origem? (e) Plote o gráico de *x* em 100 kmh e parte às 8h para ter algum tempo de sobra. Você dirige função de *t* para o intervalo de -5 s a + *5* s. () Para deslocar a curva na velocidade planejada durante os primeiros 100 m, mas, em se para a direita no gráico, devemos acrescentar a *x(t)* o termo +20t guida, um trecho em obras o obriga a reduzir a velocidade para 40 ou o termo - 20t? (g) Essa modiicação aumenta ou diminui o valor m/h por 40 m. Qual é a menor velocidade que deve manter no de *x* para o qual a partícula para momentaneamente?

resto da viagem para chegar a tempo?

• • 17 A posição de uma partícula que se move ao longo do eixo

•••12

- *Onda de choque no trânsito.* Quando o trânsito é *x* é dada por *x* = 9,75 + 1,50t3, onde *x* está em centmeros e tem intenso, uma redução brusca de velocidade pode se propagar como segundos. Calcule (a) a velocidade média durante o intervalo de um pulso, denominado *onda de choque,* ao longo da la de carros. tempo de *t* = 2,00 s a *t* = 3,00 s; (b) a velocidade instanânea em A onda de choque pode ter o sentido do movimento dos

carros, *t* = 2,00 s; (c) a velocidade instantânea em *t* = 3,00 s; (d) a veloc i o sentido oposto ou permanecer estacionária. A Fig. 2-22 mosra dade insntânea em *t* = 2,50 s; (e) a velocidade instantânea quanuma la de carros regularmente espaçados que estão se movendo do a parícula esá na metade da distância enre as posições em t =

a uma velocidade *v* = 25,00 m/s em direção a uma ila de carros 2,00 s e *t* = 3,00 s. () Plote o gráfico de *x* em função de t e indique mais lentos, uniformemente espaçados, que estão se movendo a suas respostas graicamente.

uma velocidade v, = 5,00 m/s. Suponha que cada caro mais rápido acrescenta um comprimento *L* = 12,0 m (comprimento do carro Seção 2-6 Aceleração mais a distância mínima de segurança) à la de carros mais lentos • 18 A posição de uma parícula que se move ao longo do eixo *x*

ao se juntar à ila, e suponha que reduz bruscamente a velocidade é dada por *x* = 12t2 - 2t3, onde *x* está em metros e tem segundos.

no último momento. (a) Para que distância *d* entre os caros mais Determine (a) a posição, (b) a velocidade e (c) a aceleração da parrápidos a onda de choque permanece estacionária? Se a distância é tícula em *t* = 3,0 s. (d) Qual é a coordenada positiva máxima alcanduas vezes maior que este valor, quais são (b) a velocidade e (c) o çada pela partícula e (e) em que instante de tempo é alcançada? (f) sentido (o sentido do movimento dos carros ou o sentido contrário) Qual é a velocidade posiiva máxima alcançada pela partícula e (g) da onda de choque?

em que instante de tempo é alcançada? (h) Qual é a aceleração da

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

33

partícula no instante em que a partícula não está se movendo (além supondo que a aceleração é constante, determine a aceleração em do instante *t* = O)? (i) Determine a velocidade média da parícula unidades de *g* (a) durante o lançamento; b) durante a redução de entre *t* = O e *t* = 3,0 s.

velocidade.

• 19 Em um certo instante de tempo, uma partícula inha uma ve •25 Um veículo elétrico parte do repouso e acelera em linha rea a locidade de 18 m/s no sentido positivo de *x;* 2,4 s depois, a veloci uma taxa de 2,0 m/s2 até atingir a velocidade de 20 m/s. Em seguidade era 30 m/s no sentido oposto. Qual foi a aceleração média da da, o veículo desacelera a uma taxa constante de 1,0 m/s2 até parar.

partícula durante este intervalo de 2,4 s?

(a) Quanto tempo ranscorre enre a partida e a parada? (b) Qual é

•20 (a) Se a posição de uma parícula é dada por *x* = 20t *-5t3,* a distância percoida pelo veículo desde a partida até a parada?

onde *x* está em metros e t em segundos, em que instante(s) a ve •26 Um múon (uma partícula elementar) penera em uma região locidade da partícula é zero? (b) Em que insante(s) a aceleração com uma velocidade de 5,00 X 106 m/s e passa a ser desacelerado

a* é zero? (c) Para que inervalo de tempo (positivo ou negativo) a a uma taxa de 1,25 X 1014 m/s2• (a) Qual é a distância percorrida aceleração *a

é negaiva? (d) Para que intervalo de tempo (positivo pelo múon até parar? b) Desenhe os ráicos de *x* em função de *t* e ou negativo) a aceleração *a* é positiva? (e) Desenhe os gráicos de *v* em função de *t* para o múon.

***x(t),* v(t), e *a(t)*.**

•27 Um elétron possui uma aceleração constante de +3,2 m/s2•

••21 De *t* = O a *t* = 5,00 min, um homem ica em pé sem se mover; Em um certo instante, a velocidade do eléron é +9,6 m/s. Qual é de *t* = 5,00 min a *t* = 10,0 min, caminha em linha reta com uma a velocidade (a) 2,5 s antes e b) 2,5 s depois do instante considevelocidade de 2,2 m/s. Quais são (a) a velocidade média vméd e (b) rado?

a aceleração média a éd do homem no intervalo de tempo de 2,00

i

min a 8,00 min? Quais são (c) v

•28 Em uma esrada seca, um carro com pneus novs é capz de r e md e (d) améd no intervalo de tempo de 3,00 min a 9,00 min? (e) Plote *x* em função de t e v em unção ar com uma desacelração constante de 4,92 m/s2• (a) Quanto tempo de

esse caro, inicialmente se movendo a 24,6 m/s, leva para parar? (b)

***t,* e indique como as respostas de (a) a (d) podem ser obtidas a**

partir dos gicos.

Que disância o carro percorre nesse tempo? (c) Desenhe os gráicos

de *x* em unção de t e *v* em unção de *t* durante a desacelração.

• •22 A posição de uma partícula que se desloca ao longo do eixo •29

x* varia com o tempo de acordo com a equação *x* = *ct2

Um certo elevador percorre uma distância de 190 m e ainge

- *bt3*, onde

***x* está em metros e *t* em se**

uma velocidade máxima de 305 m/min. O elevador acelera a parundos. Quais são as unidades (a) da constante *e* e (b) da constante *b?* Suponha que os valores numéri tir do repouso e desacelera de volta ao repouso a uma taxa de 1,22

cos de *e* e *b* são 3,0 e 2,0, respecivamente. (c) Em que instante a m/s2• (a) Qual é a distância percoida pelo elevador enquanto acepartícula passa pelo maior valor positivo de *x?* De *t* = 0,0 s a *t* = lera a partir do repouso até a velocidade máxima? b) Quanto tempo 4,0 s, (d) qual é a distância percoida pela partícula e (e) qual é o o elevador leva para percorrer a distância de 190 m, sem paradas, deslocamento? Determine a velocidade da partícula nos instantes partindo do repouso e chegando com velocidade zero?

(f) *t* = 1,0 s, (g) *t* = 2,0 s, (h) *t* = 3,0 s e (i) *t* = 4,0 s. Determine a •30 Os freios de um carro podem produzir uma desaceleração da aceleração da partícula nos insantes U) *t* = 1,0 s, (k) *t* = 2,0 s, (1) ordem de 5,2 m/s2• (a) Se o motorista está a 137 km/h e avista um

***t* = 3,0 s e (m) *t* = 4,0 s.**

policial rodoviário, qual é o tempo mínimo necessário para que o

carro atinja a velocidade máxima permitida de 90 km/h? (A resposta

Seção 2-7 Aceleraão Constante: Um Caso Especial

revela a inuilidade de rear para tentar impedir que a alta veloci

•23 Um eléron com velocidade inicial v

dade seja detectada por um radar ou por uma pistola de laser.) (b)

0 = 1,50 X 105 m/s penera

em uma região de comprimento *L* = 1,00 cm, onde é eletricamente Desenhe os gráicos de *x* em função de t e *v* em função de *t* durante acelerado (Figura 2-23), e sai dessa região com

a desaceleração.

***v* = 5,70 X 106m/s.**

Qual é a aceleração do elétron, supondo que seja consante?

•31 Suponha que uma nave espacial se move com uma aceleração

consante de 9,8 m/s2, o que dá aos ripulantes a ilusão de uma gra

Sem

Com

vidade normal durante o voo. (a) Se a nave parte do repouso, quanto

aceleração

aceleração

tempo leva para atingir um décimo da velocidade da luz, que é 3,0

X 108 m/s? (b) Que distância a nave percorre nesse tempo?

•32

O recorde mundial de velocidade em terra foi estabe

·---------------

lecido pelo coronel John P. Stapp em março de 1954, a bordo de

Trajetória

um renófoguete que se deslocou sobre rilhos a 1020 km/h. Ele

do elétron

e o renó foram reados até parar em 1,4 s. (Veja a Fig. 2-7.) Qual

Figura 2-23 Problema 23.

foi a aceleração experimentada por Stapp durante a frenagem, em

unidades de *g?*

•24

***Cogumelos lançadores* Alguns co**

•33 Um carro que se move a 56,0 km/h está a 24,0 m de distância

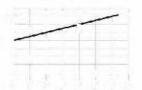
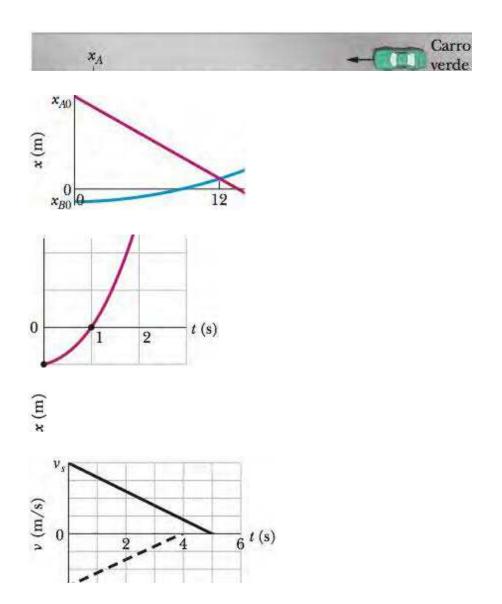
umelos lançam esporos usando um mecanismo de catapulta. Quando o vapor d'á

de um muro quando o motorisa aciona os reios . O carro bate no

ua

do ar se condensa em um esporo preso de um cogumelo, uma gota muro 2,00 s depois. (a) Qual era o módulo da aceleração consante se forma de um lado do esporo e uma película de água se forma do do carro antes do choque? (b) Qual era a velocidade do carro no ouro lado. O peso da gota faz o esporo se encurvar, mas quando a momento do chque?

película ainge a gota, a goa d'áua se espalha bruscamente pelo ••34 Na Fig. 2-24, um carro vermelho e um carro verde, iguais exlme e o esporo volta tão depressa à posição original que é lança ceto pela cor, movem-se um em dirção ao ouro em pistas vizinhas do no ar. Tipicamente, o esporo atinge uma velocidade de 1,6 m/s e paralelas a um eixo *x.* No instante *t* = O, o carro vermelho esá em em um lançamento de 5,0 *.m;* em seuida, a velocidade é reduzi *xA* = O e o carro verde está em *x8* = 220 m. Se o carro vermelho tem da a zero em 1,00 mm pelo atrito com o ar.

Usando esses dados e uma velocidade constante de 20 km/h, os carros se cruzam em x =

44,5 m; se tem uma velocidade constante de 40 *h, os carros se de 12* s e uma aceleração negativa ªJ· (a) Qual deve ser o valor de cruzam em *x* = 76,6 m. Quais são (a) a velocidade inicial e b) a *a8* para que os carros estejam lado a lado (ou seja, tenham o mesmo aceleração do carro verde?

valor de *x)* em *t* = 4,0 s? b) Para esse valor de *a8,* quantas vezes os carros icam lado a lado? (c) Plote a posiçãoxdo carro B em função

'

'

x_0 = -35,0 m no instante *t* = O. O carro vermelho tem uma ve

o l 2 3 4 5 6 7

locidade consante de 20,0 /s e o carro verde parte do repouso. Figura 2-27 Problema 39.

t (s)

Qual é o módulo da aceleração do carro verde?

••40

Você está se aproximando de um sinal de rânsito a

uma velocidade v0 = 55 /h quando o sinal ica amarelo. O módulo da maior taxa de desaceleração de que o carro é capaz é *a* =

5,18 /s2 e seu tempo de reação para começar a frear é *T* = 0,75 s.

Para evitar que a rente do carro invada o cruzamento depois que o

sinal mudar para vermelho, sua esratégia deve ser rear até parar

Figua 2-25 Problema 35.

t (s)

ou prosseguir a 55 /h se a distância até o cruzamento e a duração

da luz amarela forem, respectivamente, (a) 40 me 2,8 s, e (b) 32 m

••36 Um carro se move ao longo do eixo *x* por uma distância de e 1,8 s? As resposas podem ser frear, prosseguir, tanto faz (se as 900 m, parindo do repouso (em *x* = O) e terminando em repouso duas estratégias funcionarem) ou não há jeito (se nenhuma dases

(em *x* = 900 m). No primeiro quarto do percurso, a aceleração é tratégias uncionar).

+2,25 /s2• Nos ouros rês quartos, a aceleração pssa a ser -0,750 • • 41 Os maquinistas de dois rens percebem, de repente, que estão

/s2• Quais são (a) o tempo necessário para percorrer os 900 m e em rota de colisão. A Fig. 2-28 mostra a velocidade *v* dos rens em (b) a velocidade máxima? (c) Desenhe os gráicos da posição *x*, da função do tempo *t* enquanto estão sendo freados. A escala vertical velocidade *v* e da aceleração *a* em função do tempo *t*.

do ráico é deinida por v, = 40,0 /s. O processo de desacele

••37 A Fig. 2-26 mostra o movimento de uma partícula que se ração começa quando a distância enre os rens é 200 m. Qual é a move ao longo do eixo *x* com aceleração consante. A escala verti distância entre os trens quando, inalmente, conseguem parar?

cal do gráico é deinida por x, = 6,0 m. Quais são (a) o módulo e

(b) o sentido da aceleração da partícula?

***x* (rn)**

x, -- -- - -- !

Figura 2-28 Problema 41.

•• •42 Você está discutindo no telefone celular enquanto segue um

carro de polícia não identiicado, a 25 m de distância; os dois veículos estão a 110 /h. A discussão disrai sua atenção do carro de Figura 2-26 Problema 37.

polícia por 2,0 s (tempo suiciente para você olhar para o telefone

e exclamar: "Eu me recuso a fazer isso!"). No início desses 2,0 s, o

••38 (a) Se a aceleração máxima que pode ser tolrada pelos passa policial freia bruscamente, com uma desaceleração de 5,0 /s2• (a) geiros de um merô é 1,34 /s2 e duas esações de merô esão sepa Qual é a distância enre os dois carros quando você volta a presr radas por uma distância de 806 m, qual é a velcidade a que o atenção no rânsito? Suponha que você leve ouros 0,40 s para permerô pode alcançar enre as esações? (b) Qual é o tempo de percuso? ceber o perigo e começar a frear. (b) Se você também freia com uma (c) Se o merô para durante 20 s em cada estação, qual é a máxima ve desaceleração de 5,0 /s2, qual é a velocidade do seu carro quando locidade escalar média do merô enre o insante em que parte de uma você bate no carro de polícia?

estação e o insante em que parte da estação seguinte? Plote *x*, *v* e *a* • • •43 Quando um trem de passageiros de alta velocidade que se em função de *t* para intervalo de tempo entre o insante em que o rem move a 161 h faz uma curva, o maquinista leva um susto ao ver parte de uma estação e o insante em que parte da estação seguinte.

que uma locomotiva enrou indevidamente nos rilhos aravés de um

• •39 Os carros *A* e *B* se movem no mesmo sentido em pistas vi desvio e se encontra a uma distância *D* = 676 m à frente (Fig. 2 -29).

zinhas. A posição *x* do carro *A* é dada na Fig. 2-27, do instante *t* = A locomotiva está se movendo a 29,0 /h. O maquinista do rem O ao instante *t* = 7,0 s. A escala vertical do gráico é denida por de alta velocidade imediatamente aciona os reios. (a) Qual deve ser

***x*, = 32,0 m. Em *t* = O, o carro *B* está em *x* = O, com uma velocidade o valor mnimo do módulo da desaceleração (suposta constante) para**

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

2

4 1 . o

alta velocidade

Locomotiva

Figura 2-29 Problema 43.

Figura 2-31 Problema 51.

• •52 Um parauso se desprende de uma ponte em consrução e cai

Seção 2-9 Aceleraão em Queda Livre

90 m até chegar o solo. (a) Em quanto tempo o parafuso percorre os

•44 Um tatu assustado pula verticalmente para cima, subindo últimos 20% da queda? Qual é a velocidade (b) quando começam 0,544 m nos primeiros 0,200 s. (a) Qual é a velocidade do animal os últimos 20% da queda e (c) quando atinge o solo?

ao deixar o solo? (b) Qual é a velocidade na altura de 0,544 m? (c) • •53 Uma chave cai verticalmente de na ponte que está 45 m Qual é a altura do salto?

acima da áua. A chave atinge um barco de brinquedo que esá se

•45 (a) Com que velocidade deve ser lançada una bola vertical movendo com velcidade constante e se encontrava a 12 m do ponto mente a partir do solo para que ainja uma altura máxima de 50 m? de impacto quando a chave foi sola. Qual é a velocidade do barco?

(b) Por quanto tempo permanece no ar? (c) Esboce os gráicos de ••54 Uma pedra é deixada cair em um rio a parir de una ponte *y*, *v* e *a* em função de *t* para a bola. Nos dois primeiros gráicos, in situada 43,9 m acima da á dique o instante no qual a bola atinge a altura de 50 m.

ua. Oura pedra é atirada verticalmente

para baixo 1,0 s após a primeira ter sido deixada cair. As pedras

•46 Gotas de chuva caem 1700 m de uma nuvem até o chão. (a) Se aingem a áua ao mesmo tempo. (a) Qual era a velocidade inicial as gotas não esivessem sujeias à resistência do ar, qual seria a velo da seunda pedra? (b) Plote a velocidade em função do tempo para cidade ao ainirem o solo? (b) Seria seuro caminhar na chuva?

as duas pedras, supondo que *t* = O é o instante em que a primeira

•47 Em um prédio em consrução, uma chave de rifo chega ao pedra foi deixada cair.

solo com una velocidade de 24 /s. (a) De que alura um operário • • 55 Uma bola de argila úmida cai 15 ,O m até o chão e permanece a deixou cair? (b) Quanto tempo durou a queda? (c) Esboce os grá em contato com o solo por 20,0 ms antes de parar completamente.

icos de *y, v* e *a* em função de *t* para a chave de grifo.

(a) Qual é o módulo de aceleração média da bola durante o tempo

•48 Um desordeiro joga una pedra verticalmente para baixo com de contato com o solo? (Trate a bola como uma partícula.) (b) A una velocidade inicial de 12,0 /s, a partir do telhado de um edií aceleração média é para cima ou para baixo?

cio, 30,0 m acima do solo. (a) Quanto tempo a pedra leva para aingir • •56 A Fig. 2-32 mostra a velocidade vem função da alura *y* para o solo? (b) Qual é a velocidade da pedra no momento do choque? uma bola lançada verticalmente para cima ao longo de um eixo *y.* A

•49 Um balão de ar quente está subindo com uma velocidade de 12 distância *d* é 0,40 m. A velocidade na altura YA é *vA.* A velocidade

/s e se encontra 80 m acima do solo quando um tripulante deixa na alura *y8* é v,/3. Determine a velocidade v.,.

cair um pacote. (a) Quanto tempo o pacote leva para atingir o solo?

(b) Com que velocidade atinge o solo?

V

• •50 No insante *t* = O, una pessoa deixa cair a maçã 1 de uma

ponte; pouco depois, a pessoa joga a maçã 2 verticalmente para

baixo do mesmo local. A Fig. 2-30 mosra a posição vertical *y* das

duas maçãs em função do tempo durante a queda até a esrada que

1

1

passa por baixo da ponte. A escala horzontal do gráico é deinida

1

1

gVA

- - - - - - 1 - - - - - -

por t, = 2,0 s. Aproximadamente com que velocidade a maçã 2 foi

1

jogada para baixo?

[illegible] -**

-

**--- - - - [illegible]

o

1

"

1--

d- - i

, I '

Figura 2-32 Problema 56.

's

' ' ' '

• • 57 Para testar a qualidade de uma bola de tênis, você a deixa cair

no chão de uma altura de 4,00 m. Depois de quicar, a bola atinge

uma altura de 2,00 m. Se a bola permanece em contato com o piso

por 12,0 ms, (a) qual é o módulo de aceleração média durante esse

o

contato e (b) a aceleração média é para cima ou para baixo?

t,

• •58 Um objeto cai de uma altura *h* a partir do repouso. Se o o b

Figura 2-30 Problema 50.

jeto percorre uma distância de *0,50h* no úlimo 1,00 s, determine (a)

. . -

[illegible]

--

se encontra (a) a seunda e (b) a terceira gota?

••60 Uma pedra é lançada verticalmente para cima a partir do

1

solo no instante *t* = O. Em *t* = 1,5 s, a pedra ulrapassa o alto de 1 ,_

1

l -- ·- t - • ' t·

**1 1 **

'

uma torre; 1,0 s depois, atinge a altura máxima. Qual é a altura da

o

50

100

140

torre?

***t* (ms)**

•••61 Uma bola de aço é deixada cair do telhado de um edifício e Figura 2-34 Problema 66.

leva 0,125 s para passar por uma janela, uma distância correspondente a 1,20 m. A bola quica em uma calçada e tona a passar pela • •67 Quando una bola de futebol é chutada na direção de um jogador e o jogador a desvia de cab

janela, de baixo para cima, em 0,125 s. Suponha que o movimento

ça, a aceleração da cabeça durante a colisão pode ser relativamene grande. A Fig. 2-35 mosra para cima coresponde exatamente ao inverso da queda. O tempo a aceleração *a(t)* da cabeça de um jogador de futebol sem e com que a bola passa abaixo do peitoril da janela é 2,00 s. Qual é a altura capacete, a partir do repouso. A escala vertical é deinida por a, =

do edifício?

200 /s2• Qual é a diferença enre a velocidade da cabeça sem e

•••62

- Ao pegar um rebote, um jogador de basquete pula com o capacete no insante *t* = 7,0 ms?

76,0 cm vericalmente. Qual é o tempo total (de subida e descida)

que o jogador passa (a) nos 15 cm mais altos e b) nos 15 cm mais

' -

baixos do salto? Esses resulados explicam por que os jogadores de

1

Sem ca :

p

L

'

permanece à vista por um tempo total de 0,50 s e a altura da janela

o

2

4

6

é 2,00 m. Que distância acima do alto da janela o vaso ainge?

***t* (1ns)**

•••64 Uma bola é lançada verticalmente para cima a partir da su Figura 2-35 Problema 67.

perfície de ouro planeta. O gráico de *y* em função de *t* para a bola é mostrado na Fig. 2-33, onde *y* é a altura da bola acima do ponto ••68

Uma salamandra do gênero *Hydroantes* captura a

de lançamento e *t* = O no instante em que a bola é lançada. A escala presa lançando a línua como um projétil: a parte traseira da língua vertical do gráico é deinida por y, = 30,0 m. Quais são os módu se projeta bruscamente para a frente, desenrolando o resto da língua los (a) de aceleração em queda livre no planeta e (b) da velocidade até que a parte dianteira atinja a presa, capurando-a. A Fig. 2-36

inicial da bola?

mostra o módulo *a* de aceleração em função do tempo *t* durante a fase de aceleração em uma siuação típica. As acelerações indicadas

Ys

são a, = 100 /s2 e a *2* = 400 /s2• Qual é a velocidade da língua no inal da fase de aceleração?

0o 1 2 3 1 5

o

10

20

30

40

Figura 2-33 Problema 64.

***t* (s)**

Figura 2-36 Problema 68.

***t* (ms)**

••69 Que distância percorre em 16 s um corredor cujo gráico

Sção 2-1 o Integração de Gráficos em Análise de

velocidade-tempo é mostrado na Fig. 2-30? A escala vertical do

Movimento

-

gráico é denida por v, = 8,0 m.

•65

A Figura 2-13 mostra a aceleração da cabeça e do tronco

de um volunário durante una colisão rontal. Qual é a velocidade

1

1

1

1 1

represenada na Fig. 2-34 para o caso de um lutador experiente. A

o

4

8

12

16

escala vertical é deida por v, = 8,0 /s. Qual é a distância per-Figura 2-37 Problema 69.

t (s)

PARTE 1

MOVIMENTO RETILÍNEO

37

•••70 Duas partículas se movem ao longo do eixo *x.* A posição do pelotão tenham acabado de chegar ao cruzamento 2, onde o sinal da partícula 1 é dada por *x* = *6,00t2* + 3,00t + 2,00, onde *x* está abiu quando os caros estavam a uma distância *d* do cruzamento . Os em meros e *tem* segundos; a aceleração da partícula 2 é dada por carros continuam a se mover a uma cera velocidade *v* (a velocida

P

***a* = -8,00t, onde *a* está em metros por seundo ao quadrado e de máxima permitida) até chegarem ao cruzamento 3. As distâncias**

***t* em seundos. No instante *t* = O, a velocidade da partícula 2 é entre os cruzamentos são D23 e D12• (a) Quanto tempo depois que 20 m/s. Qual é a velocidade das paríciculas no instante em que têm o sinal do cruzamento 2 abriu o sinal do cruzamento 3 deve abrir a mesma velocidade?**

para que o sinal do cruzamento 3 abra quando os primeiros carros

do pelotão estão a uma distância *d* do cruzamento 3?

Problemas dicionais

Suponha que o pelotão tenha encontrado o sinal fechado no

71 Em um videogame, um ponto é programado para se deslocar na cruzamento 1 . Quando o sinal do cruzamento 1 abre, os carros da tela de acordo com a função *x = 9,00t* - 0,750t3, onde *x* é a distânfrente precisam de um certo tempo *t* para arrancar e de um tempo cia em centímetros em relação à extremidade esquerda da tela e *t* é adicional para atingir a velocidade de cruzeiro *v* com uma certa

P

o tempo em segundos. Quando o ponto chega a uma das bordas da aceleração *a.* (b) Quanto tempo depois que o sinal do cruzamento tela, *x* = O ou *x* = 15,0 cm, o valor de *t* é zerado e o ponto come 1 abriu o sinal do cruzamento 2 deve abrir para que o sinal do cru

ça novamente a se mover de acordo com a unção *x(t).* (a) Em que zamento 2 abra quando os primeiros carros do pelotão estão a uma instante após ser iniciado o movimento o ponto se enconra momendistância *d* do cruzamento 2?

taneamente em repouso? (b) Para que valor de *x* isso acontece? (c)

Qual é a aceleração do ponto (incluindo o sinal) no instante em que

[I l]

MÃOONKA

isso acontece? (d) O ponto está se movendo para a direita ou para

a esquerda pouco antes de atingir o repouso? (e) O ponto está se

m. - m -

r m

.

movendo para a direita ou para a esquerda pouco depois de aingir

o repouso? () Em que insante *t* > O o ponto atinge a borda da tela

l

2

3

pela primeira vez?

I

D12-

i

·I -

 D2sl

72 Uma pedra é lançada verticalmente para cima a partir da borda

do terraço de um ediício. A pedra atinge a altura máxima 1,60 s Figua 2-39 Problema 76.

após ter sido lançada e, em seguida, caindo paralelamente ao ediício, chega ao solo 6,00 s após ter sido lançada. Em unidades do SI: 77 Um carro de corrida é capaz de acelerar de O a 60 /h em (a) com que velocidade a pedra foi lançada? (b) Qual foi a altura 5,4 s. (a) Qual é a aceleração média, em m/s2, durante este intervamáxima aingida pela pedra em relação ao terraço? (c) Qual é a al lo? (b) Qual é a distância percorrida pelo carro em 5,4 s, supondo tura do ediício?

que a aceleração seja constante? (c) Quanto tempo o carro leva para

percorrer uma distância de 0,25 km, a partir de repouso, mantendo

73 No instante em que um sinal de trânsito ica verde, um au uma aceleração constante igual ao valor do item (a)?

tomóvel começa a se mover com uma aceleração consante *a* de

2,2 m/s2

78 Um trem vermelho a 72 km/h e um trem verde a 144 km/h estão

• No mesmo instante, um caminhão, que se move com uma

velocidade constane de 9,5 *!s*, ultrapassa o automóvel. (a) A que na mesma linha, retilínea e plana, movendo-se um em dirção ao distância do sinal o automóvel alcança o caminhão? (b) Qual é a ouro . Quando a disância enre os trens é 950 m, os dois maquinisvelocidade do automóvel nesse instante?

tas percebem o perigo e acionam os reios, fazendo com que os dois

trens soram uma desaceleração de 1,0 m/s2

74 Um piloto voa horizonalmente a 1300 kmh a uma altura

• Os trens conseguem

***h* = frear a tempo de evitar uma colisão? Caso a resposa seja negativa,**

35 m acima do solo inicialmente plano. No instante *t* = O, o piloto determine as velocidades dos rens no momento da colisão; caso começa a sobrevoar um terreno inclinado para cima de um ângulo seja positiva, determine a distância nal entre os rens.

***}* = 4,3º Fiura 2-38). Se o piloto não mudar a trajetória do avião,**

em que instante *t o* avião se chocará com o solo?

79 No instante *t* = O, um alpinista deixa cair um grampo, sem velocidade inicial, do alto de um paredão. Após um curto intervalo de tempo, o companheiro de escalada, que está 10 m acima, lança ouro

}

ie [illegible]

•

grampo para baixo. A Fig. 240 mosra as posições *y* dos rampos

h

•

'

durante a queda em função do tempo *t.* Com que velocidade o segundo grampo foi lançado?

"

Figura 2-38 Problema 74.

' '. ' '

75 O tempo necessário para frear um carro pode ser dividido em

duas partes: o tempo de reação para o motorista começar a frear

e o tempo necessário para que a velocidade cheue a zero depois

que o reio é acionado. A distância total percorida por um caro é

56,7 m quando a velocidade inicial é 80,5 km/h e 24,4 m quando a

o

l

2

3

velocidade inicial é 48,3 kmlm. Supondo que a aceleração permat (s)

nece constante depois que o freio é acionado, determine (a) o tempo
Figura 2-40 Problema 79.

de reação do motorista e (b) o módulo da aceleração.

76 -

A Fig. 2-39 mosra parte de uma rua na qual se pretende 80 Um trem partiu do repouso com aceleração constante. Em um conrolar o tráfego para permitir que um *pelotão* de veículos araves certo instante, esava se movendo a 30 m/s; 160 m adiante, esava se se vários cruzamentos sem parar. Suponha que os primeiros carros movendo a 50 m/s. Calcule (a) a aceleração, (b) o tempo necessário

para percorrer os 160 m mencionados, (c) o tempo necessário para 86 Um motociclisa que está se movendo ao longo do eixo *x* na atingir a velocidade de 30 m/s e (d) a distância percorida desde o dirção leste tem uma aceleração dada por *a* = (6,1 - l,2t) m/s2

repouso até o insante que o rem atingiu a velocidade de 30 m/s. (e) para O ; *t* ; 6,0 s. Em *t* = O, a velocidade e a posição do ciclista Desenhe os gráicos de *x* em função de *t* e de *v* em função de *t,* de são 2,7 m/s e 7,3 m. (a) Qual é a velocidade máxima atingida pelo

***t* = O até o instante em que o trem atingiu a velocidade de 50 *ls.* ciclista? b) Qual é a distância percorrida pelo ciclisa entre *t* = O e 81 A aceleração de uma partícula ao longo do eixo *x* é *a* = *5,0t, t* = 6,0 s?**

com *t* em segundos e *a* em metros por segundo ao quadrado. Em 87 Quando a velocidade máxima pemitida na New York Thruway

***t* = 2,0 s, a velocidade da partícula é + 17 m/s. Qual é a velocidade foi aumentada de 55 milhas por hora para 65 milhas por hora, quanto da partícula em *t* = 4,0 s?**

tempo foi economizado por um motorista que dirigiu 700 m enre a

82 A Fig. 2-41 mosra a aceleração *a* em unção do tempo *t* para entrada de Bufalo e a saída da cidade de Nova York na velocidade uma partícula que se move ao longo do eixo *x.* A escala vertical máxima permiida?

do ráico é deinida por *as* = 12,0 m/s2• No instante *t* = -2,0 s, a 88 Um carro que se move com aceleração constante percorreu em velocidade da partícula é 7,0 m/s. Qual é a velocidade da parícula 6,00 s a distância de 60,0 m que separa dois pontos. A velocidade no instante *t* = 6,0 s?

do carro ao passar pelo segundo ponto era 15,0 m/s. (a) Qual era a

velocidade no primeiro ponto? (b) Qual ra o módulo de aceleração?

(c) A que distância do primeiro ponto o carro se encontrava em repouso? (d) Desenhe os gráicos de *x* em função de te vem função de *t* para o caro, desde o repouso *(t* = O) até o segundo ponto.

89

***:* Um certo malabarista normalmente aremessa bolas ver**

f-- - 1-

,

ticalmente até uma alura *H.* A que altura as bolas devem ser arremessadas para passarem o dobro do tempo no ar?

90 Uma partícula parte da origem em *t* = O e se move no sentido

positivo do eixo *x*. O gráico da velocidade da partícula em função

do tempo é mostrado na Fig. 2-43; a escala vertical é deinida por

Figura 2-41 Problema 82.

***vs* = 4,0 m/s. (a) Qual é a coordenada da partícula em *t* = 5,0 s? b) Qual é a velocidade da parícula em *t* = 5,0 s? (c) Qual é a acele83 A Fig. 2-42 mosra um disposiivo simples que pode ser usado ração da partícula em *t* = 5,0 s? (d) Qual é a velocidade média da para medir o seu tempo de reação: uma ira de papelão marcada com partícula entre *t* = 1,0 s e *t* = 5,0 s? (e) Qual é a aceleração média uma escala e dois pontos. Um amigo segura a tira na *vertical,* com da partícula entre *t* = 1,0 s e *t* = 5,0 s?**

o polegar e o indicador no ponto da direita da Fig. 2-42. Você posiciona o polegar e o indicador no outro ponto (o ponto da esquerda da Fig. 2-42), sem tocar a tira. Seu amigo solta a tira e você tenta

segurá-la assim que percebe que começou a cair. A marca na posi

ção em que você segura a tira corresponde ao seu tempo de reação.

(a) A que distância do ponto inferior você deve colocar a marca de

50,0 ms? Por que valor você deve multiplicar essa distância para

O

determinar a marca de (b) 100 ms, (c) 150 ms, (d) 200 ms, e (e)

1 2 3 4 5 6

Figura 2-43 Problema 90.

t

250 ms? (Por exemplo: a marca de 100 ms deve estar no dobro da

(s)

distância correspondente à marca de 50 ms? Nesse caso, a resposta

seria 2. Você é capaz de ideniicar algum padrão nas respostas?)

91 Deixa-se cair uma pedra de um penhasco com 100 m de altura.

Quanto tempo a pedra leva para cair (a) os primeiros 50 m e (b) os

Tempo de reação (r1s)

50 m seguintes?

+

92 A distância entre duas estações de metrô é 1100 m. Se um trem

1

1 •

acelera a + 1,2 m/s2 a partir do repouso na primeira meade da distância e desacelera a -1,2 m/s2 na segunda meade, quais são (a) o "

o

o tempo de percurso entre as estações e (b) a velocidade máxima

do trem? (c) Desenhe os gráicos *dex, v,* e *a* em função de *t* para o Figura 2-42 Problema 83.

percurso entre as duas estações.

84 -

Trenós a jato, montados em trilhos reilíneos e planos, 93 Uma pedra é lançada verticalmente para cima. Durante a susão usados para investigar os efeitos de grandes acelerações sobre bida, passa por um ponto *A* com velocidade *v* e por um ponto *B*,

seres humanos. Um desses renós pode atingir uma velocidade de 3,00 m acima de *A*, com velocidade *v2*. Calcule (a) a velocidade *v*

1600 kmh em 1,8 s a partir do repouso. Determine (a) a aceleração e (b) a altura máxima alcançada pela pedra acima do ponto *B*.

(suposta consante) em unidades de *g* e b) a distância percorrida. 94 Deixa-se cair uma pedra, sem velocidade inicial, do alto de um 85 Um vagonete de minério é puxado para o alto de uma encosta ediício de 60 m. A que distância do solo está a pedra 1,2 s antes de a 20 km/h e puxado ladeira abaixo a 35 km/h até a altura inicial. chegar ao solo?

(O empo gasto para inverter o movimento no alto da encosa é tão 95 Um renó a vela está se movendo para leste com velocidade pequeno que pode ser desprezado.) Qual é a velocidade média do constante quando uma rajada de vento produz uma aceleração conscarrinho no percurso de ida e volta, ou seja, desde a altura inicial tante para leste durante 3,0 s. O ráico de *x* em função de t apaaté voltar à mesma altura?

rece na Fig. 2-44, onde *t* = O é tomado como o instante em que o

PARTE 1

MOVIMENTO RETI LÍNEO

39

vento começou a soprar e o sentido positivo do eixo *x* é para leste. é o tempo de queda? (c) Qual é a velocidade do elevador ao passar (a) Qual é a aceleração do trenó durante o intervalo de 3,0 s? (b) pelo ponto médio da queda? (d) Por quanto tempo o elevador estava Qual é a velocidade do trenó no inal do intervalo de 3,0 s? (c) Se caindo ao passar pelo ponto médio?

a aceleração permanece constante por mais 3,0 s, qual é a distância 98 Deixa-se cair dois diamantes da mesma altura, com 1,0 s de percorrida pelo renó no segundo intervalo de 3,0 s?

intervalo. Quanto tempo após o primeiro diamante começar a cair

a distância enre os diamantes é 10 m?

30

99 Uma bola é lançada verticalmente para baixo do alto de um

25

J

20

ediício com 36,6 m de altura. A bola passa pela extremidade su

'

perior de uma janela que está 12,2 m acima do solo 2,00 s após o

. 15

'

lançamento. Qual é a velocidade da bola ao passar pela extremidade

(10

superior da janela?

5

-.

ºo

1

100 Um paraquedista sala de um avião e percorre 50 m em que

0,5

l

1,5

2

2,5

3

da livre. Em seguida, abre o paraquedas e sofre uma desaceleração

***t* (s)**

constante de 2,0 m/s2, chegando ao solo com uma velocidade de 3,0

Figura 2-44 Problema 95.

***fs.* (a) Quanto tempo o paraquedista passa no ar? b) Qual era a**

altitude do avião no momento do salto?

96 Deixa-se cair uma bola de chumbo de um trampolim situado 101 Uma bola é lançada verticalmente *para baixo* de uma alura 5,20 m acima da superfície da áua de um lago. A bola atinge a *h* com uma velocidade inicial v0• (a) Qual é a velocidade da bola água com uma certa velocidade e conserva a mesma velocidade até pouco antes de atingir o solo? (b) Quanto tempo a bola leva para chegar ao fundo do lago, 4,80 s após começar a cair. (a) Qual é a chegar ao solo? Quais seriam as respostas (c) do item a e (d) do profundidade do lago? Quais são o (b) módulo e (c) o sentido (para item b se a bola fosse lançada *para cima* da mesma altura e com a cima ou para baixo) da velocidade média da bola durante a queda? mesma velocidade inicial? Antes de calcular a resposta, veriique Suponha que toda a água do lago seja drenada. A bola é agora lan se as resposas dos itens (c) e (d) devem ser maiores, menores ou çada verticalmente do trampolim com uma certa velocidade inicial iguais às dos itens (a) e (b).

e novamente chega ao fundo em 4,80 s. Quais são (d) o módulo e 102 O esporte em que uma bola se move mais depressa é o jai alai, (e) o sentido da velocidade inicial da bola?

no qual as velocidades medidas chegam a 303 /h. Se um jogador

97 O cabo que sustenta um elevador de obra vazio arrebena quan proissional de jai alai se defronta com uma bola a essa velocidade do o elevador está em repouso no alto de um edifício de 120 m de e pisca involuntariamente, deixa de ver a cena por cerca de 100 ms.

altura. (a) Com que velocidade o elevador chega ao solo? (b) Qual Que distância a bola percore durante esse piscar de olhos?

C A P f T U L O

VETO R ES

O Q U E É FÍSI CA?

A ísica lida com um grande número de grandezas que possuem uma amplitude e uma orientação e precisa de uma linguagem matemáica especial, a linguagem dos vetores, para descrever essas randezas. Essa linguagem também é usada na engenharia, em outras ciências e até mesmo nas conversas do dia a dia. Se você

já explicou a alguém como chegar a um endereço usando expressões como "Siga

por esta rua por cinco quarteirões e depois dobre à esquerda", usou a linguagem dos

vetores. Na verdade, qualquer ipo de navegação se baseia em vetores, mas a física

e a engenharia também usam vetores para descrever fenômenos que envolvem rota

ções e forças magnéticas, como veremos em capítulos posteriores. Neste capíulo,

vamos discuir a linguagem básica dos vetores.

3-2 Vetores e Escalares

Uma partícula que se move em linha reta pode se deslocar em apenas dois senidos,

já que a direção é conhecida. Podemos considerar o deslocamento como positivo em

um desses senidos e negaivo no ouro. No caso de uma partícula que se move em

qualquer oura trajetória, porém, um número posiivo ou negaivo não é suiciente

para indicar a orientação; precisamos usar um *vetor.*

Um vetor possui um módulo e uma orientação; os vetoes seguem certas reras de

combinação, que serão discutidas neste capíulo. Uma grandeza vetorial é uma grandeza

que possui um módulo e uma orienação e pode, portanto, ser representada por um vetor.

O desloamento, a velocidade e a aceleração são xemplos de randezas ísicas vetoriais.

Como neste livro serão apresenadas muitas ouras grandezas vetoriais, o conhecimento

das reras de combinação de vetores será de grande uilidade para o leitor.

Nem toda grandeza física envolve uma orientação. A temperatura, a pressão,

a enegia, a massa e o tempo, por exemplo, não "apontam" em nenhuma direção.

Chamamos essas grandezas de escalares e lidamos com elas pelas regras da álgebra

comum. Um único valor, às vezes com um sinal (como no caso de uma temperatura

de -2ºC), é suficiente para especificar um escalar.

A grandeza vetorial mais simples é o deslocamento ou mudança de posição.

(a)

Um vetor que representa um deslocamento é chamado, como seria de se esperar, de

vetor deslocamento. (Ouros exemplos de vetor são os vetores velocidade e o vetor aceleração.) Se uma parícula muda de posição movendo-se de *A* para *B* na Fig.

3-la, dizemos que sore um deslocamento de *A* para *B*, que representamos por uma *B*

seta apontando de *A* para *B.* A seta especiica o vetor graicamente. Para distinguir símbolos vetoriais de ouros ipos de setas neste livro, usamos um triângulo vazado

na ponta das setas que representam vetores.

(b)

Na Fig. 3-la, as seas de *A* para *B*, de *A'* para *B'* e de *A"* para *B"* têm o mesmo Figua 3-1

módulo e a mesma orientação; assim, especiicam vetores deslocamento iguais e repre

***(a)* As tês seas**

têm o mesmo módulo e a mesma

sentam a mesma *variação de posição* da parícula. Um vetor pode ser deslcado sem

orientação e, pornto, representam que o seu valor mude *se* comprimento, direção e senido permanecerem os mesmos.

o mesmo deslocamento. *(b)* As três

O vetor deslocamento nada nos diz sobre a trajetória percoida por uma partírajetórias que ligam os dois pontos cula. Na Fig. *3-lb,* por exemplo, as rês rajetórias que unem os pontos *A* e B correscoespondem ao mesmo vetor pondem ao mesmo vetor deslocamento, o da Fig. 3- *la.* O vetor deslocamento não

deslocaento.

representa todo o movimento, mas apenas seu resultado final.

$\vec{a}$
$\vec{a} + (\vec{b} + \vec{c})$
$\vec{b}$
$\vec{a}$
$\vec{b} + \vec{c}$
$\vec{c}$
$\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$
$\vec{c}$
$(\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c}$
$\vec{a}$
$\vec{b}$

PARTE 1

VETORES

41

3-3 Soma Geométrica de Vetores

**Trajetória [illegible]

Suponha gue, como no diagrama vetorial da Fig. 3-2a, uma partícula se desloque de real

A* a *B* e, depois, de *B* a *C.* Podemos representar o deslocamento total (independentemente da rajetória seguida) através de dois vetores deslocamento sucessivos, *AB

e *BC.* O *deslocamento total* é um único deslocamento de *A* para *C.* Chamamos *AC A*

O deslocamento total

de vetor soma (ou vetor resultante) dos vetores *B* e *BC.* Este ipo de soma não é é a soma dos vetores

Para

- -

uma soma algébrica comum.

(a)

somar *a* e *b,*

Na Fig. *3-2b,* desenhamos os vetores da Fig. *3-2a* e os rotulamos da forma que

faça a origem de

será usada daqui em diante, com uma seta sobre um símbolo em itálico, como ã. Para

***b* coincidir com a**

indicar apenas o módulo do vetor (uma randeza posiiva e sem direção), usamos o

extremidade de â.

símbolo do vetor em itálico sem a sea, como *a, b* e *s.* (Você pode usar simplesmente um símbolo manuscrito.) Uma seta sobre um símbolo indica que a grandeza repre

-

senada pelo símbolo possui as propriedades de um vetor: módulo e orienação.

J

Podemos representar a relação entre os três vetores da Fig. 3- *2b* através da

(b) [illegible] Para obter o vetor

equação vetorial

resultante, ligue a

origem de *ã* à

-

.

[illegible]

S

extremidade de

= *G*

b.

T *b,*

(3-1)

segundo a qual o vetor *s* é o vetor soma dos vetores *ã* e *b.* O símbolo + na Eq. Figua 3-2 *(a) AC* é a soma vetorial 3-1 e a palavra "soma" têm um signiicado diferente no caso dos vetores porque, dos vetores *AB* e *BC. (b)* Outra forma de ao contrário do que acontece na álgebra comum, envolvem tanto o módulo como a rotular os mesmos vetores.

orientação da randeza.

A Fig. 3-2 sugere um método para somar geomericamente dois vetores bidimensionais *ã* e *E.* (1) Desenhe o vetor *ã* em uma escala conveniente e com o ângulo apropriado. (2) Desenhe o vetor *E* na mesma escala, com a origem na extremidade

do vetor ã, também com o ângulo apropriado. (3) O vetor soma *s*

- -

é o vetor que vai

So1na vetorial

da origem de *ã* à extremidade de *b*.

a*+ *b

A soma vetorial, definida desta forma, tem duas propriedades importantes. Em

primeiro lugar, a ordem em que os vetores são somados é irrelvante. Somar *ã* a *E*

é o mesmo que somar *E* a *ã* Fig. 3-3), ou seja,

+

.

.

***a* + *b* = *b* + *a* (lei co1nuta1iva).**

(3-2)

A ordem dos vetores

na soma não afeta o

Em segundo lugar, quando existem mais de dois vetores, podemos agrupá-los em

resultado.

qualquer ordem para somá-los. Assim, se queremos somar os vetores ã, *b* e ê, podemos somar *ã* e *E* e somar o resultado a ê. Podemos também

somar *E* e ê e depois Figua 3-3 A ordem em que os vetores somar o resultado a *ã;* o resultado é o mesmo, como mostra a Fig. 3-4. Assim,

são somados não afea o resultado; veja

a Eq. 3-2.

***(ã* + *b)* + *e* = *ã* + *(b* + e) (lei associativa).**

(3-3)

O vetor *-b* é um vetor com o mesmo módulo e direção de *b* e o senido oposto

(veja a Fig. 3-5). A soma dos dois vetores da Fig. 3-5 é

- -

***b* + (-b) = o.**

A ordem dos vetores

na soma não afeta o

-

resultado. -

lu

ã*+ *b

â* + *b

+

f,

Figua 3-4 Os vetores ã, E e ê podem ser agrupados em qualquer ordem para serem

Figua 3-5 Os vetores *E* e -*E* êm o

somados; veja a Eq. 3-3.

mesmo módulo e sentidos opostos .

Assim, somar *-b* é o mesmo que subtrair *b.* Usamos esa propriedade para defmir

-

-

a diferença entre dois vetores. Se *d* = ã - *b,* temos:

o

-

+

***d* = *a* - *b* = *a* + *(* +)**

-b

(subtração de vetores);

(3-4)

(a)

ou seja, calculamos o vetor diferença *d* somando o vetor *-b* ao vetor ã. A Fig. 3-6

Observe a posição

dos vetores para

mosra como isso é feito geometricamente.

a soma

Como na álgebra comum, podemos passar um termo que inclui um símbolo de

vetor de um lado de uma equação vetorial para o ouro, mas devemos mudar o sinal.

Assim, por exemplo, para explicitar *ã* na Eq. 3-4, escrevemos a equação na forma

.-.

.

[illegible]

[illegible]

d + b = *a* ou *a* = d + b.

(b)

Embora tenhamos usado nestes exemplos vetores deslocamento, as regras para

somar e subrair vetores se aplicam a vetores de qualquer ipo, sejam eles usados

Figura 3-6 (a) Os vetores *ã,* b e -b.

-

para representar velocidade, aceleração ou qualquer outra grandeza vetorial. Enre

(b) Para subtrair o vetor *b* do vetor *ã,*

tanto, apenas vetores do mesmo tipo podem ser somados. Assim, por exemplo, po

basta somar o vetor -b ao vetor *ã.*

demos somar dois deslocamentos ou duas velocidades, mas não faz senido somar

um deslocamento e uma velocidade. Na aritméica dos escalares, isso seria como

tentar somar 21 s e 12 m.

"TESTE 1

Os módulos dos deslocamentos *a* e *b* são 3 me 4 m, respectivamente, e *e* = *ã* + *b*. Considerando as várias orientações possíveis de *a* e *E*, qual é (a) o maior e (b) o menor valor possível do módulo de e?

Exemplo

Soma gráica de vetores em um teste de campo

-

Em um teste de campo, você recebe a tarefa de se afastar

a

- *a* --

o máximo possível de um acampamento aravés de rês

e

deslocamentos reilíneos. Você pode usar os seguintes

- -

***d*= *b* + - -**

deslocamentos, em qualquer ordem: (a) ã, 2,0 km para

a*-*c

leste; (b) *b*, 2,0 m 30° ao norte do leste; (c) *e*, 1,0 km

para oeste. Você pode também subsituir *b* por -*b* e ê por

>

-

Este é o vetor resultante

e

-ê. Qual é a maior distância que você pode atingir após

da soma dos três vetores

Escala e1n un

em qualquer ordem.

o terceiro deslocamento?

o

l

2

***Raciocínio* Usando uma escala conveniente, desenhamos**

(a)

(b)

os vetores ã, *b,* ê, *-b* e -e, como na Fig. 3-7a. Em segui Figura 3-7 (a) Vetores deslocamento; três devem ser da, deslocamos mentalmente os vetores sobre a página, usados. b) A distância do acampamento será a maior possível sem mudar a orientação, ligando três vetores de cada vez, se os deslocamentos escolhidos forem ã, *b* e - e, em qualquer ordem.

em um arranjo no qual a origem do segundo vetor está

ligada à exremidade do primeiro e a origem do terceiro

está ligada à extremidade do segundo, para encontrar o

-

dem em que os vetores são somados não impora, já que

vetor soma, *d.* A origem do primeiro vetor representa o a soma vetorial é a mesma para qualquer ordem. A ordem acampamento. A extremidade do terceiro vetor repre-mostrada na Fig. 3-7b é para a soma vetorial senta o ponto de desino. O vetor soma *d* vai da origem

d = b + â + (-?).

do primeiro vetor à exremidade do terceiro. O módulo

d* do vetor soma é a distância enre o ponto de desino e Usando a escala da Fig. 3-7a, medimos o comprimento *d

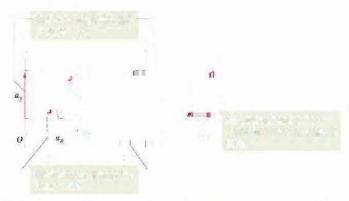
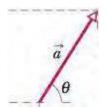
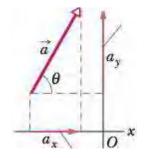
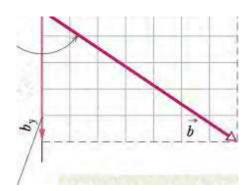
o acampamento.

do vetor resultante, enconrando

Examinando todos os casos possíveis, descobrimos

***d* = 4,8 01.**

(Resposta)

que a distância é máxima para o arranjo ã, *b,* -ê. A or-

PARTE 1

VETORES

3

3-4 Componentes de Vetores

Somar vetores geometricamente pode ser uma arefa tediosa. Uma técnica mais elegante e mais simples envolve o uso da álgebra, mas requer que os vetores sejam represenados em um sistema de coordenadas retangulares. Os eixos *x* e *y* são normalmente desenhados no plano do papel, como na Fig. 3-8a. O eixo z é perpendicular ao papel; vamos ignorá-lo por enquanto e traar apenas de vetores bidimensionais.

Uma componente de um vetor é a projeção do vetor em um eixo. Na Fig. 3-8a,

por exemplo, *ax* é a componente do vetor ã em relação ao eixo *x* e *ay* é a componente em relação ao eixo *y.* Para encontrar a projeção de um vetor em um eixo, traçamos

retas perpendiculares ao eixo a parir da origem e da extremidade do vetor, como

mosra a igura A projeção de um vetor no eixo *x* é chamada de *componente x* do

vetor; a projeção no eixo *y* recebe o nome de *componente y.* O processo de obter as componentes de um vetor é chamado de decomposição do vetor.

Uma componente de um vetor tem o mesmo sentido (em relação a um eixo) que

o vetor. Na Fig. 3-8, *ax* e *ay* são posiivas porque ã aponta no sentido positivo dos dois eixos. (Observe as setas que mostram o sentido das componentes.) Se inverêssemos o sentido do vetor ã, as componentes seriam negaivas e as setas apontariam

-

no senido negativo dos eixos *x* e *y.* A decomposição do vetor *b* da Fig. 3-9 leva a uma componente bx positiva e a uma componente bY negativa

Um vetor pode ter até rês componentes, mas, no caso do vetor da Fig. 3-8a, a

componente z é nula. Como mosram as Figs. 3-8a e b, quando deslocamos um vetor

sem mudar a orientação, as componentes não mudam.

Podemos determinar geomericamente as componentes de *ã* na Fig. 3-8a a partir

do riângulo retângulo mosrado na figura:

***ax* = *a* cos J e ᶜ*v* = *a* seu e,**

(3-5)

onde} é o ângulo que o vetor ã faz com o semieixo *x* positivo e *a* é o módulo de ã.

A Fig. 3-8c mosra que *ã* e as componentes *x* e *y* do vetor formam um riângulo retângulo. A igura mostra também que é possível reconsruir um vetor a partir das componentes: basta posicionar a origem de uma das componentes na exremidade da

outra e completar o riângulo retângulo ligando a origem livre à extremidade livre.

Uma vez que um vetor tenha sido decomposto em relação a um conjunto de

eixos, as componentes podem ser usadas no lugar do vetor. Assim, por exemplo, o

vetor *ã* da Fig. 3-8a é dado (completamente determinado) por *a* e O, mas também

- - Esta é a componente - -.

***y* do vetor.**

y

a_x
x
a_y
$\vec{a}$

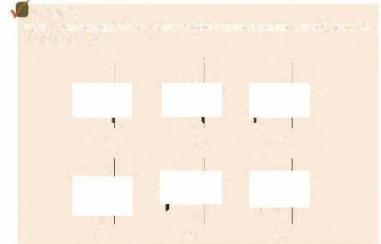
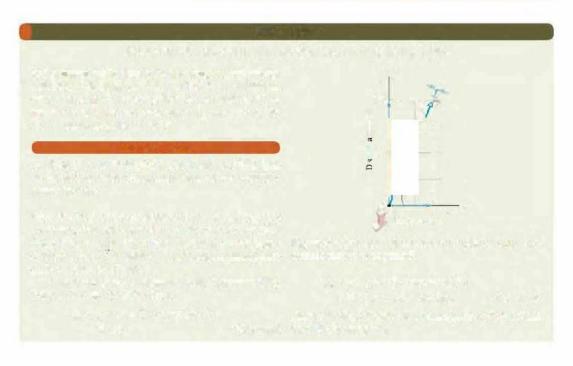
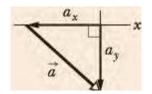
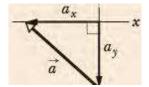
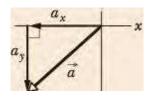
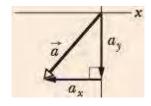
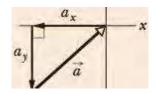
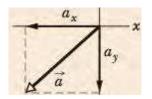
a_x
x
a_y
$\vec{a}$

a_x
x
a_y
$\vec{a}$

x
$\vec{a}$
a_y
a_x

a_x
x
a_y
$\vec{a}$

a_x
x
a_y
$\vec{a}$

22°
215 km
θ

pode ser dado pelas componentes *ax* e *ªr* Os dois pares de valores contêm a mesma informação. Se conhecemos um vetor na *noação de componentes (ax* e *ay)* e queremos especificá-lo na notação *módulo-ângulo* (a e *8),* basta usar as equações *a* = [illegible] + *a;* e

ly

tan *e* = -

ªx

(3-6)

para efetuar a transformação.

No caso mais geral de rês dimensões, precisamos do módulo e de dois ângulos

(a, } e *p,* digamos) ou de rês componentes (ax, ay e az) para especiicar um vetor.

TESTE 2

Quais dos métodos indicados na iura são corretos para determinar o vetor ã a partir das

componentes *x* e *y?*

y

y

y

100

Disância (km)

o sentido posiivo dex para leste e o de *y* para o norte (Fig.

3-1 O). Por conveniência, a origem é colocada no aeroporto. Figura 3-1 O Um avião decola de um aeroporto na origem e é O deslocamento *d* do avião aponta da origem para o ponto avistado mais tarde no ponto *P*.

onde o avião foi avistado.

-

Para determinar as componentes de *d*, usamos a Eq.

d. = d sen J = (215 km)(sen 68º)

3-5 com *8* = 68° (= 90° - 22°):

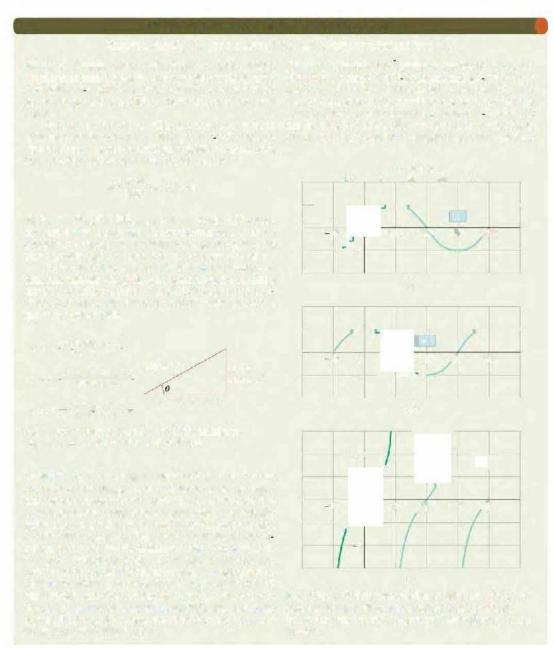
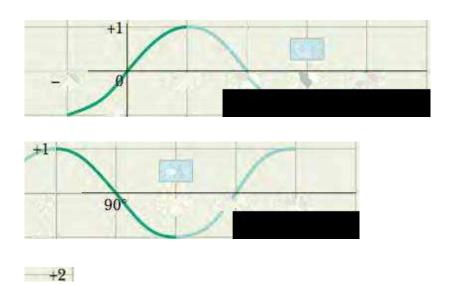
= 199 km = 2,0 X 102 km.

(Resposta)

dx = d cos J = (215 km)(cos 68º)

Assim, o avião foi avistado 81 km a leste e 2,0 X 102 km

= 81 km

(Resposta) ao norte do aeroporto.

PARTE 1

VETORES

45

Táticas para a Solução de Problemas

A

Angulos, funções tigonométicas e funções trigonométricas inversas

-
-

Tática 1: Angulos-Graus e Raanos **Angulos medidos** ***Táca 4: Medida dos Angulos de um Vetor*** **As expres-em relação ao semieixo** ***x*** **positivo são positivos se são medidos sões de cos** ***8*** **e sen** ***8*** **na q. 3-5 e de tan** ***8*** **na Eq. 3-6 são válidas no sentido ani-horário e negaivos se medidos no sentido horá apenas se o ânulo for medido em relação ao semieixo** ***x*** **posiirio. Assim, por exemplo, 210º e -150º representam o mesmo vo. Se o ânulo for medido em relação a ouro eixo, talvez seja ângulo.**

preciso trocar as funções trigonométricas da Eq. 3-5 ou inverter

Os ânulos podem ser medidos em graus ou em radianos a razão da Eq. 3-6. Um método mais seuro é converter o ângulo (rad). Para relacionar as duas unidades, lembre-se de que uma dado em um ânulo medido em relação ao semieixo ***x*** **positivo.**

circunferência é descrita por um ânulo de 360º ou 2r rad. Para

converter, digamos, 40º para radianos, escrevemos

Quadrantes

IV

I

II

III

IV

Oº ***2r*** **rad**

4

30º = 0,70 rad.

Tática 2: Funções Trigonoméricas **A Fig. 3-11 mostra**

sen

as definições das funções rigonoméricas básicas (seno, cosseno

90º

180º

270º

360º

e tangente), muito usadas na ciência e na engenharia, em uma

- 90º

forma que não depende do modo como o riângulo é rotulado.

-1

O leitor deve saber como essas funções trigonoméricas variam com o ângulo (Fig. 3-12), para poder julgar se o resultado mosrado por uma calculadora é razoável. Em algumas circuns

(a)

tâncias, o simples conhecimento do sinal das funções nos vários

quadrantes pode ser útil.

cos

" cateto oposto a 8

Figura 3-1 1 Triânulo usado para definir as funções

rigonométricas. Veja também o Apêndice E.

***Táica 3: Funções Trigonoméricas Inversas* Quando**

se usa uma calculadora para obter o valor de uma função trigonomérica inversa como sen-1, cos-1 e tan-1, é preciso veriicar se o resultado faz sentido, pois, em geral, existe oura solução

- 90º

90º

J80º

270º

360º

'

possível que a calculadora não fonece. Os intervalos em que

as calculadoras operam ao fonecer os valores das funções rigonoméricas inversas estão indicados na Fig. 3-12. Assim, por

- 2

exemplo, sen-1(0,5) pode ser iual a 30º (que é o valor mosrado

pela calculadora, já que 30° está no intervalo de operação) ou a

150º. Para verificar que isso é verdade, trace uma rea horizontal

(e)

passando pelo valor 0,5 na escala verical da Fig. 3-12a e observe Figura 3-12 Gráficos das rês funções trigonoméricas. As os pontos em que a

reta intercepta a curva da função seno. Como partes mais escuras das curvas correspondem aos valores

,

é possível saber qual é a resposta correa? E a que parece mais fonecidos pelas calculadoras para as funções rigonométricas razoável para uma dada situação.

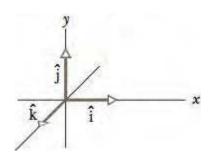
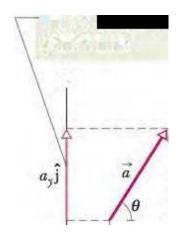
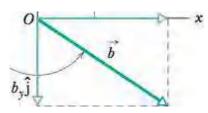
. *inversas.*

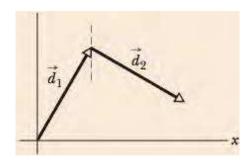
3-5 Vetores Unitários

Vetor unitário é um vetor cujo módulo é 1 e que aponta em uma certa direção. Um

vetor unitário não possui dimensão nem unidade; sua única unção é especiicar uma

orientação. Neste livro, os vetores [illegible] q_ue indicam os senidos positivos dos

eixos *x, y* e *z,* são representados como i, j e k, respecivamente, onde o símbolo A

$$d_x = a_x - b_x, \quad d_y = a_y - b_y, \quad \text{e} \quad d_z = a_z - b_z,$$

onde

$$\vec{d} = d_x\hat{i} + d_y\hat{j} + d_z\hat{k}. \tag{3-13}$$

Os vetores unitários

é usado, em lugar de uma sea, para mosrar que se rata de vetores unitios Fig.

coincidem com os eixos.

3-13). Um sistema de eixos como o da Fig. 3-13 é chamado de sistema de coordenadas dextroiro. O sistema permanece dexrogiro quando os três eixos sorem a mesma roação, qualquer que seja. Os sistemas de coordenadas usados neste livro

são todos dexrogiros.

Os vetores unitários são muito úteis para especificar ouros vetores; assim, por

-

exemplo, podemos expressar os vetores ã e *b* das Figs. 3-8 e 3-9 como

.

'

,

a

z

= axi + ayJ

.. . .

(3-7)

A A

Fipua 3-13 Os vetores unirios i, j

e

b = bxi + byj.

(3-8)

e k definem os sentidos positivos de um

A

A

sistema de coordenadas dextrogiro.

Essas duas equações estão ilustradas na Fig. 3-14. As grandezas axi e ay j são vetores, conhecidos como componentes vetoriais de *ã.* As grandezas ax e ay são

escalares, conhecidos como componentes escalares (ou, simplesmente, compo

Esta é a componente

nentes) de *ã.*

ydo vetor.

y

3-6 Soma de Vetores a patir das Componentes

Podemos somar vetores geomeicamente, usando um desenho. Também podemos

somar vetores diretamente na tela de uma calculadora gráfica. Uma terceira forma

1

de somar vetores, que é a forma que discuiremos em seguida, consiste em combinar

1 1 1

as componentes eixo por eixo.

1 1

Para começar, considere a equação

- --i

1

1

-

.

+

-

-,+-- -r--A-!L-- X

***r* = *a* + *b* '**

(3-9)

O

-

lxl

segundo a qual o vetor r é igual ao vetor (ã + b). Nesse caso, cada componente de

forem iguais. De acordo com as Eqs. 3-9 a 3-12, para somar dois vetores ã e *b*,

podemos (1) obter as componentes escalares dos vetores; (2) combinar as componentes escalares, eixo por eixo, para obter as componentes do vetor soma, *r;* (3) combinar as componentes de r para obter o vetor r. Isso pode ser feito de duas

(b)

maneiras: podemos expressar *r* em termos dos vetores unitários ou através da no

Figua 3-14 *(a)* Componentes

tação módulo-ângulo.

vetoriais do vetor [illegible] *(b)* Componentes

Esse método de somar vetores usando componentes também se aplica à subravetoriais do vetor *b.*

ção. Lembre-se de que uma subração como *d* = ã - *E* pode ser escrita como uma

-

-

-

adição da forma d = ã + (-b). Para subrair, somamos as componentes de ã e -b

para obter

-TESTE 3

- -

(a) Quais são os sinais das componentes x de d1 e d *2*

Y

na igura? (b) Quais são os sinais das componentes *y*

de d e d

1

2? Quais são OS sinais das componentes *X* e

y de d + d

1

***2*?**

A

b **= (-1,6 m)i + (2,9 m)j,**

eixo por eixo, e usando as componentes resultantes para

e

e **= (-3,7 m)j.**

obter o vetor soma *r.*

Qual é o vetor soma r que também aparece na Fig. *Cálculos* No caso do eixo *x,* somamos as componentes *x* 3-15a?

de ã, *b* e ê para obter a componente *x* do vetor soma r:

'

rx = ax + bx + Cx

)

T

= 4,2 m - 1,6 m + O = 2,6 n.

--- - - [illegible] 3 _ Para somar os vetores,

b

calcule a componente

Analogamente, no caso do eixo *y,*

2 total *x* e a componente

'

total *y.*

A

- 2,3j

***r* = V(2,6 m)2 + (-2,3 m)2 = 3,5 m**

(Resposta)

e o ângulo (medido em relação ao semieixo *x* posiivo) é

- 3

dado por

Este é o resultado da soma.

***e* = tan- (-2 3**

1

' m) = -41°,

2,6 m

(Resposta)

Figua 3-15 O vetor *r* é a soma vetorial dos outros rês

onde o sinal negativo significa que o ângulo deve ser me

vetores.

dido no senido horário.

Exemplo

Soma de vetores usando componentes: fonniga do deserto

A formiga do deserto *Cataglyphis fortis* vive nas planícies *y*, nas orientações mostradas na Fig. 3-16a, partindo do do deserto do Saara.

Quando uma dessas formigas sai à formigueiro. No final do quinto movimento, quais são o procura de alimento, percorre um caminho aleatório em módulo e o ângulo do vetor deslocamento toal d, e quais *01*

um terreno plano, arenoso, desprovido de acidentes geo são os valores correspondentes do vetor de retomo dvotta que gráicos que possam ser usados como referência. Mesmo liga a posição final da formiga à posição do formigueiro?

assim, quando a formiga decide voltar ao formigueiro, Em uma situação real, esse cálculo vetorial pode envolver ruma diretamente para casa. De acordo com as pesquisas, milhares desses movimentos.

a formiga do deserto mantém um regisro dos seus movimentos em um sistema de coordenadas mental. Quando decide voltar ao formigueiro, soma os deslocamentos em

IDEIAS-CHAVE

relação aos eixos do sistema para calcular um vetor que (1) Para encontrar o deslocamento resultante *d* apona diretamente para o ponto de pida. Como exemplo

°″ precisamos somar os cinco vetores deslocamento:

desse cálculo, considere uma formiga que executa cinco

movimentos de 6,0 cm em um sistema de coordenadas

dtot

A Eq. 3-14 nos dá

3,8cm

d

X

101,x= +6,0 cm + (-5,2 cm) + (-6,0 cm)

8,2 cm

X

+ (-3,0 cm) + O

Formigueiro

Formigueiro

= -8,2 cm.

(>)

(e)

Analogamente, calculamos as componentes *y* dos cinco Figura 3-16 (a) Movimentos de uma formiga do deserto. (b) movimentos usando a parte correspondente a y da Eq. 3-5. Componentes *x* e *y* de d, Os resultados aparecem na Tabela 3-1. Subsituindo esses

0,. (e) O vetor d,,o1ta indica o caho

de volta para o formigueiro.

resultados na Eq. 3-15, obtemos:

d,ot,y = +3,8 cm.

Atenço: Como foi dito na Táica para a Solução de Problemas 3, uma calculadora nem sempre fonece o resultado Tabela 3-1

correto para o arco tangente. A resposta -24,86° parece

indicar que vetor a,ot está no quarto quadrante do nosso sis

Mov. d, (ctn)

d. (ctn)

tema de coordenadas _xy._ Entretanto, quando desenhamos

1

+6,0

o

o vetor a parir das componentes Fig. 3-16b), vemos que

2

- 7

-),_

T 3,0

_d,_ está no segundo quadrante. Assim, precisamos "cori

_01_

3

-6,0

o

gir" a resposta da calculadora somando 180°:

3-16b. Para enconrar o módulo eo ângulo ded,

O vetor d

0, a parir das

vot,a , que aponta da formiga para o formiguei-

-

componentes, usamos a Eq. 3-6. O mdulo é dado por

ro, tem o mesmo módulo que d, *0,* e o senido oposto Fig.

3-16c). Já temos o ângulo (-24,86° . -25°) para o senido

-

-

oposto a d, *01'* Assim, dv011a é dado por

d

= J(-8;2 cm)2 +(3,8 cm)2 = 9,0 cm.

volta = 9,0 cm e -25º.

(Resposta)

Para enconrar o ângulo (medido a parir do semieixo *x* Uma formiga do deserto que se afasa mais de 500 m do posiivo), calculamos o arco angente:

formigueiro realiza, na verdade, milhares de movimentos.

-

Ainda assim, de alguma forma é capaz de calcular dvolu

) **= tan -1** ***(d'º"'*** **)**

(sem estudar este capítulo).

d,o,x

(3-16)

3,8cm

= tan-1 (

) = -24,86º.

-8;2cm

PARTE 1

VETORES

49

3-7 Vetores e as Leis da Física

Até agora, em toda a figura em que aparece um sistema de coordenadas, os eixos

***x* e *y* são paralelos às bordas do papel. Assim, quando um vetor ã é desenhado, as componentes ax e aY também são paralelas às bordas do papel (como na Fig. 3-17 a).**

A única razão para usar esta orientação dos eixos é que parece "apropriada"; não

existe uma razão mais profunda. Podemos, perfeitamente, girar os eixos (mas não

o vetor ã) de um ângulo *p,* como na Fig. 3-17 *b,* caso em que as componentes terão novos valores, *a;* e *a;* .. Como existe uma infinidade de valores possíveis de *p,* existe um número infinito de pares possíveis de componentes de ã.

Qual é, então, o par de componentes "correto"? A resposta é que são todos igualmente válidos, já que cada par (com o sistema de eixos

correspondente) constitui uma forma diferente de descrever o mesmo vetor *ã;* todos produzem o mesmo módulo e

a mesma orientação para o vetor. Na Fig. 3-17, temos:

***a* = Va2 + a2 *Y* = Va'2**

***r* + a' 2**

x

(3-18)

e

Y

) =)' + J.

(3-19)

A verdade é que temos uma grande liberdade para escolher o sistema de coordenadas, já que as relações enre vetores não dependem da localização da origem nem da orientação dos eixos. Isso também se aplica às leis da ísica; são todas independentes da escolha do sistema de coordenadas. Acrescente a isso a simplicidade e riqueza da linguagem dos vetores e é fácil compreender por que as leis da física são

quase sempre apresenadas nessa linguagem: uma equação, como a Eq. 3-9, pode

representar rês (ou até mais) relações, como as Eqs. 3-10, 3-11 e 3-12.

3-8 Multiplicação de Vetores*

Existem três formas de muliplicar vetores, mas nenhuma é exatamente igual à multiplicação algébrica. Ao ler esta seção, tenha em mente que uma calculadora o ajudará a muliplicar vetores apenas se você compreender as regras básicas deste tipo de muliplicação.

Multiplicação de um Vetor por um scalar

Quando muliplicamos um vetor ã por um escalars, obtemos outro vetor cujo módulo

é o produto do módulo de ã pelo valor absoluto de *s*, cuja direção é a mesma de ã

e cujo sentido é o mesmo de *ã* se s for positivo e o sentido oposto se s for negaivo.

Para dividir ã por *s*, multiplicamos ã por 1/s.

Se os eixos giram, as

componentes mudam, mas

o vetor permanece o mesmo.

***y* l _**

y

)

\ _

\ 1 1 1 *x'* Figura 3-17 (a) O vetor *ã* e

****

suas componentes. (b) O mesmo

vetor, com os eixos do sistema

de coordenadas girados de um

(a)

(b)

ângulo >.

*** Como os assuntos discutidos nesta seção serão aplicados apenas em capítulos posteriores (Capítulo 7, no caso do produto escalar, e Capítulo 11, no caso do produto vetorial), talvez o professor preira deixar o estudo desta seção para ,nais tarde.**

Multiplicação de um Vetor por um Vetor

Existem duas formas de muliplicar um vetor por um vetor: uma forma (conhecida

como *produto escaar)* resulta em um escalar; a oura (conhecida como *produto vetorial)* resulta em um vetor. (Os estudantes costumam confundir as duas formas.) O Produto scalar

O produto escalar dos vetores *ã* e *b* da Fig. 3-18a é escrito como ã · *b* e deinido pela equação

- -

***a* · *b* = *ab* cos *p*,**

-

- (3-20)

onde *a* é o módulo de *ã, b* é o módulo de *b* e > é o ângulo enre *ã* e *b* (ou, mais apropriadamente, enre as orientações de ã e *b).* Na realidade, existem dois ângulos

possíveis: > e 360° - >. Qualquer dos dois pode ser usado na Eq. 3-20, já que os

cossenos dos dois ângulos são iguais.

Note que o lado direito da Eq. 3-20 contém apenas escalares (incluindo o valor

de cos >).Assim, o produto ã · *b* no lado esquerdo representa uma grandeza escalar e é lido como "a escalar b".

O produto escalar pode ser considerado como o produto de duas grandezas: (1)

o módulo de um dos vetores e (2) a componente escalar do outro vetor em relação

ao primeiro. Assim, por exemplo, na Fig. 3-18b, ã tem uma componente escalar a

cos > em relação a *b;* note que essa componente pode ser determinada raçando uma

-

-

perpendicular a *b* que passe pela exremidade de ã. Analogamente, *b* possui uma componente escalar *b* cos p em relação a ã.

Se o ângulo > entre dois vetores é Oº, a componente de um vetor em relação ao ouro é

mxima, o que também acontece com o produto escalar dos vetores. Se o ângulo é 90º,

a componente de um vetor em relação ao outro é nula, o que também acontece com o

produto escalar.

Para chamar atenção para as componentes, a Eq. 3-20 pode ser escrita da seguinte forma:

ã · b* = (acos >*)(b)* = *(a)(b* cos *a).

(3-21)

Como a propriedade comutativa se aplica ao produto escalar, podemos escrever

 '

 ,

a · b* = *b·a.

-ó

(a)

A componente de -

ó

e1n relação a

***âé* ó cos >**

'

Multiplicando esses

'

' ' '

$$\vec{a}\cdot\vec{b} = (a_x\hat{\mathrm{i}} + a_y\hat{\mathrm{j}} + a_z\hat{\mathrm{k}})\cdot(b_x\hat{\mathrm{i}} + b_y\hat{\mathrm{j}} + b_z\hat{\mathrm{k}}),$$

$$\vec{a}\cdot\vec{b} = a_xb_x + a_yb_y + a_zb_z.$$

PARTE 1

VETORES

51

Quando os dois vetores são escritos em termos dos vetores unitários, o produto escalar assume a forma (3-22)

que pode ser expandida de acordo com a propriedade disributiva. Calculando os

produtos escalares das componentes vetoriais do primeiro vetor pelas componentes

vetoriais do segundo vetor, obtemos:

(3-23)

TESTE 4

Os vetores C e D têm módulos de 3 unidades e4 unidades, respecivamente. Qual é o ânulo entre esses vetores se C · D é iual a (a) zero, (b) 12 unidades e (c) -12 unidades?

Exemplo

A

Angulo entre dois vetores usando o produto escalar

A

A

-

A

Qual é o ângulo *p* entre *ã* = 3,0i - 4,0 j e *b* = -2,0i + Podemos calcular o lado esquerdo da Eq. 3-24 escreven3,0k? *(Atenção:* muitos dos cálculos a seguir não são ne do os vetores em termos dos vetores unitários e usando a cessários quando se usa uma calculadora, mas o leitor propriedade disribuiva:

aprenderá mais sobre produtos escalares se, pelo menos

.

-

[illegible]

A

a · *b* = (3,01 - 4,0J) · (-2,01 + 3,0k)

no início, executar esses cálculos.)

= (3.01) · (-2.1) + (3.01) · (3.0k)

+ (-4,0]') · (-2,0i) + (-4,0j) · (3,0k).

IDEIA-C HAVE

Em seguida, aplicamos a Eq. 3-20 a cada termo desta úl

O ângulo enre as orientações dos dois vetores aparece na ima expressão. O ângulo enre os vetores unitários do definição do produto escalar (Eq. 3-20):

A

A

primeiro termo (i e i) é 0° e os ouros ângulos são 90°.

. .

Assim, temos:

***a* · *b* = *ab* cos <>.**

(3-24)

•

ã · *b* = -(6,U}(l) + (9,0)(0) + (8,0)(0) - (12)(0)

***Cálculos* Na Eq. 3-24, *a* é o módulo de ã, ou seja,**

= -6,0.

Subsituindo este resultado e os resulados das Eqs. 3-25

***a* = /3,02 + (-4,0)2 = 5,oo,**

(3-25) e 3-26 na Eq. 3-24, obtemos:

e *b*

-6,0 = (5,00)(3,61) cos <>,

é o módulo de *b*, ou seja,

b

e

-

--1

-6,0

o

o

,,. co ·

= 109 = 110 . (Resposta)

= vc-2.0)2 - 3,02 = 3,61.

(3-26)

, - s (5,00)(3,61)

O Produto Vetorial

O produto vetoril de *ã* e *b* é escrito como ã X *b* e resulta em um terceiro vetor, ê, cujo módulo é

***e* = *ab* sen >,**

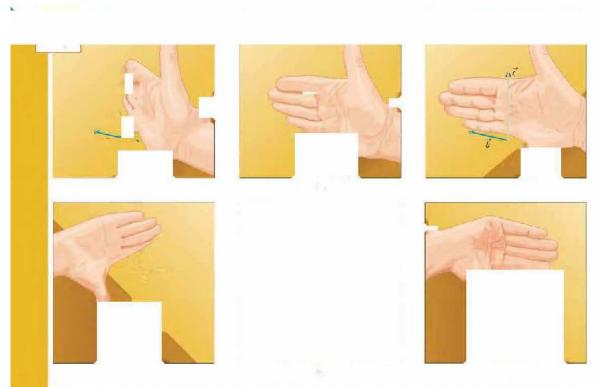
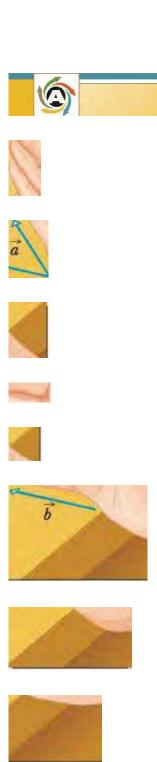
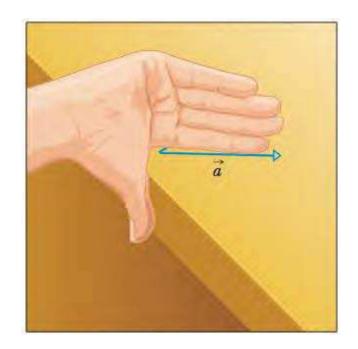
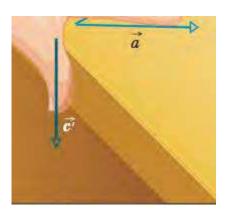
(3-27)

onde *p* é o *menor* dos dois ângulos entre ã e *b.* (É preciso usar o menor dos ângulos entre os vetores porque sen p e sen(360º - p) têm sinais opostos.) O produto *ã* X E

é lido como *"a* vetor *b".*

Se ã e *b* são paralelos ou aniparalelos, ã X *b* = O. O módulo de *ã* X *b,* que pode ser escrito como lã X EI, é mximo quando *ã* e b são mutuamente perpendiculares.

$\vec{a}$

$\vec{a}$
$\vec{c}$

CAPÍTULO 3

A direção de ê é perpendicular ao plano deinido por ã e *E.* A Fig. 3-l *9a* mosra como determinar o sentido de ê = ã X *b* usando a chamada rgra da mão direita.

-

Superponha as origens de ã e *b* sem mudar a orientação dos vetores e imagine uma reta perpendicular ao plano deinido pelos dois vetores, passando pela origem comum. Envolva essa rea com a mão *direita* de modo que os dedos empurrem ã em direção a b ao longo do menor ângulo entre os vetores. O polegar estendido apontará no sentido de ê.

No caso do produto vetorial, a ordem dos vetores é importante. Na Fig. 3-19b,

estamos determinando o senido de ê' = *b* X ã, de modo que os dedos da mão direita

-

empurram *b* na direção de ã ao longo do menor ângulo. Neste caso, o polegar no sentido oposto ao da Fig. 3-19a, de modo que ê' = -ê, ou seja,

.

-

)

)

b x ã = -(a x b).

(3-28)

Em outras palavras, a propriedade comutativa não se aplica ao produto vetorial.

Em termos dos vetores unitários, podemos escrever

>

"

,

A

A

'

A

ã X b = (axi + ay.i + l k) X (b

z

xi + byj + bz k),

(3-29)

que pode ser expandido de acordo com a propriedade distributiva, ou seja, calculando o produto vetorial de cada componente do primeiro vetor pelas componentes do segundo vetor. Os produtos vetoriais dos vetores unitários aparecem no Apêndi-

-· ***b***

(a)

,?

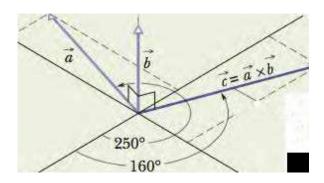
__ ; -_ >

a

(b)

Figua 3-19 lusração da regra da mão direita para produtos vetoriais. (a) Empure o vetor ã na direção do vetor *b* com os dedos da mão direita. O polegar estendido mosra a orientação do vetor ê = ã X *b.* (b) O vetor *b* X ã tem o sentido oposto ao de ã X *b.*

$$a_x\hat{\mathrm{i}} \times b_x\hat{\mathrm{i}} = a_x b_x(\hat{\mathrm{i}} \times \hat{\mathrm{i}}) = 0,$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_y b_z - b_y a_z)\hat{\mathrm{i}} + (a_z b_x - b_z a_x)\hat{\mathrm{j}} + (a_x b_y - b_x a_y)\hat{\mathrm{k}}.$$

PARTE 1

VETORES

3

ce E (veja "Produtos de Vetores"). Assim, por exemplo, na expansão da Eq. 3-29,

temos:

A

A

porque os vetores unitários i e i são paralelos e, portanto, o produto vetorial é zero.

Analogamente, temos:

.

.

.

.

****

axi X byj = axby(i X j) = axby k.

A

A

No úlimo passo, usamos a Eq. 3-27 para descobrir que o módulo de i X j é 1. (O

A

A

A

A

módulo dos vetores i e j é 1 e o ângulo enre i e j é 90°.) Usando a regra da mão

A

A

direita, descobrimos que o senido de i X j é o sentido do semieixo *z* posiivo, ou seja, o senido de k.

Coninuando a expandir a Eq. 3-29, é possível mosrar que

(3-30)

Também é possível calcular o resulado de um produto vetorial usando um determinante (veja o Apêndice E) ou uma calculadora.

Para veriicar se um sistema de coordenadas *xyz* é um sistema dexrogiro, basta

A

A

A

aplicar a regra da mão direita ao produto vetorial i X j = k no sistema dado. Se os deA

A

dos empurrarem i (semieixox positivo) na direção de j (semieixo *y* posiivo) e o polegar estendido apontar no sentido do semieixo *z* posiivo, o sistema é dexrogiro.

TESTE 5

Os vetores *ê* e D têm módulos de 3 unidades e 4 unidades, respectivamente. Qual é o ângulo enre esses vetores se o módulo do produto vetorial *C* X *D* é iual a (a) zero e b) 12 unidades?

Exemplo

Produto vetorial: regra da mão direita

Na Fig. 3-20, o vetor *ã* está no plano *y*, tem um módulo de

-

18 unidades e uma orientação que faz um ângulo de 250°

.

Rotação de *a* para *b*.

com o semieixo *x* positivo. O vetor *b* tem um módulo de

12 unidades e está orientado ao longo do semieixo *z* positiva. Qual é o produto vetorial ê = *ã* X *b*?

," '--Este é o produto

IDEIA-CHAVE

vetorial, perpendicular

Quando cohecemos dois vetores na notação módulo-ângua âe *b.*

lo, podemos calcular o módulo do produto vetorial usando *X*

y

a Eq. 3-27 e determinar a orientação do produto vetorial Figura [illegible] O vetor e (no plano *y)* é o produto vetorial dos usando a regra da mão direita da Fig. 3-19.

vetores ã e b.

***Cálculos* O módulo do produto vetorial é dado por**

orientação de *ê.* Assim, como mostra a figura, *ê* está no

e

plano *xy.* Como a direção de *ê* é perpendicular à dire

= absen> = (18)(12)(sen90º) = 216.

(Resposta) ção de ã (o produto vetorial sempre resulta em um vetor

Para determinar a orientação do produto vetorial na Fig. perpendicular aos dois vetores originais), o vetor faz um 3-20, coloque os dedos da mão direita em tono de uma ângulo de

reta perpendicular ao plano de ã e b (a reta na qual se

250º - 90º = 160º

(Resposta)

encontra o vetor ê) de modo que os dedos empurrem o

vetor *ã* na direção de *b;* o polegar estendido fornece a com o semieixo *x* positivo.

$$\vec{a} = a_x\hat{\text{i}} + a_y\hat{\text{j}} + a_z\hat{\text{k}},$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = (a_x\hat{\text{i}} + a_y\hat{\text{j}} + a_z\hat{\text{k}}) \cdot (b_x\hat{\text{i}} + b_y\hat{\text{j}} + b_z\hat{\text{k}}),$$

Exemplo

Produto vetorial usando vetores unitários

A

A

-

A

A

-

Se *ã* = 3i-4j e *b* = -2i + 3k, determine ê =*ã Xb.*

Podemos calcular os valores dos diferentes termos usando

a Eq. 3-27 e determinando a orientação dos vetores com

IDEIA-CHAVE

o auxílio da regra da mão direita. No primeiro termo, o

rado observando que ê · ã = O e ê · *b* = O, ou [illegible] que não

.

A

+ (-4j) X 3k.

existem componentes de *e* em relação a *ã* e *b.*

REVISÃO E RESUMO

Escalares e Vetores *Grandezas escalares,* como temperatura, Soma de Vetores na Forma de Componentes Para somar possuem apenas um valor numérico. São especificadas por um nú vetores na forma de componentes, usamos as regras mero com uma unidade (lOºC, por exemplo) e obedecem às regras

da arimética e da álgebra comum. As *grandezas vetoriais,* como

***r.* = ª• . bx ,,. = *a.* r b> 'z = *a,* + b,.**

(3-10 a 3-12)

-

o deslocamento, possuem um valor numérico (módulo) e uma onde *ã* e *b* são os vetores a serem somados e *r* é o vetor soma. Note orientação (5 m para cima, por exemplo) e obedecem às regras da que adicionamos as componentes do eixo por eixo.

álgebra vetorial.

Produto de um Escalar por um Vetor O produto de um escalar

Soma Geométrica de Vetores Dois vetores *ã* e *b* podem ser *s* por um vetor v é um vetor de módulo *sv* com a mesma orientação somados geomericamente desenhando-os na mesma escala e posi de i se *s* for positivo e com a orientação oposta se *s* for negativo.

cionando-os com a origem de um na exremidade do outro. O vetor Para dividir ii por *s*, multiplicamos i por 1/s.

que liga a as exremidades livres dos dois vetores é o vetor soma,

***s*.**

-

Para subrair b de *ã*, invertemos o sentido de b para obter - h e O Produto Escalar O produto escalar de dois vetores *ã* e b é somamos -b a *ã*. A soma vetorial é comutaiva e associativa.

representado por *ã* · b e é igual à grandeza *escalar* dada por

- -

Componentes de um Vetor As *coponentes* (escalares) *a*, e

.

[a] *b = ab* os *)*,

(3-20)

aY de um vetor bidimensional *ã* em relação ao eixos de um sistema

de coordenadas *y* são obidas raçando retas perpendiculares aos onde > é o menor dos ângulos entre as direções de *ã* e *b*. O proeixos a partir da origem e da exremidade de *ã*. As componentes duto escalar é o produto do módulo de um dos vetores pela comsão dadas por ponente escalar do outro em relação ao primeiro. Em termos dos

vetores unitários,

***a*, = *acos J* e *aJ* = *asenJ*,**

(3-5)

(3-22)

onde *J* é o ângulo entre *ã* e o semieixo *x* positivo. O sinal algébrico de uma componente indica o sentido da componente em relação ao que pode ser expandida de acordo com a lei disributiva. Note que

- -

eixo correspondente. Dadas as componentes, podemos determinar *ã. b* = *b* . *ã.*

o módulo e a orientação de um vetor i através das equações

-

O Produto Vetorial_ O produto vetorial de dois vetores *ã* e *b*,

***a* = Va2 *X* + *a2)* e tan 8 = *ªr* .**

(3-6) representado por *ã* X *b*, é um *vetor e* cujo módulo e é dado por *Qi*

A

A

A

e

Notação com Vetores Unitários

= *ab* sen >,

(3-27)

Os *vetores unitários* i, j e k

-

têm módulo unirio e senido igual ao sentido positivo dos eixos *x*, *y* onde > é o menor dos ângulos entre as dirções de *ã* e *b.* A oriena-e z, respectivamente, em um sistema de coordenadas dexrogiro. Po ção de *ê*

são as componentes escalares.

que pode ser expandida de acordo com a lei disributiva.

$\vec{d}_1$
x
z
y
y
z
x
z
$\vec{v}$
$\vec{v}$
x
$\vec{v}$
x

PARTE 1

VETORES

55

1

P E R G U N T A S

1

1 A soma dos módulos de dois vetores pode ser igual ao módulo

X

da soma dos mesmos vetores? Justiique sua resposta.

2 Os dois vetores da Fig. 3-21 estão em um plano *y*. Determine

x--!---

os sinais das componentes *X* e Y, respectivamente, de (a) a, + d2; (b)

a, -J2; (c) *d2 - dl.*

y

z

y

3 Como a mascote da Univrsidade da lórida é um jacaré, a equipe

de golfe da universidade joga em um cmpo onde existe um lago com
Figura 3-23 Pergunta 5.

jacarés. A Fig. 3-22 mostra uma vista aérea da região em tomo de um

dos buracos do cmpo com um sistema de codenadas *y* superposto. 8 Se *ã*
· *b* = i · e, *b* é necessariamente igual a e?

As acadas da equipe devem levar a bola da origem até o buraco, que

está nas coordenadas (8

9 Se *F* = *q(v*

, 12 m), mas a bola pode sofrer apenas os

X *B)* e *v* é perpendicular a *B,* qual é a orientação de

seguintes deslocaments, que pdem ser usados mais de uma vez:

B nas três situações mosradas na Fig. 3-24 se a constante q for (a)

positiva e (b) negativa?

J. = (8 n1)1 + (6 n1)},

a; = (6 1n)J,

[illegible] = (8 m)1.**

y

y

O lago está nas coordenadas (8 , 6 m). Se um membro da equipe

F

F

lança a bola no lago, é imdiamente transferido para a Universidade Estadual da Flórida, a etena rival. Que sequência de deslocamentos deve ser usada por um membro da equipe para eviar o lago?

z

z

F

y

(1)

(2)

(3)

o Bco

Figura 3-24 Pergunta 9.

-gode

V jrs

1 O A Fig. 3-25 mostra um vetor *À* e outros quatro vetores de mesmo módulo e orientações diferentes. (a) Quais dos outros quatro vetores têm o mesmo produto escalar com À? (b) Quais têm um

Figua 3-22 Pergunta 3.

produto escalar com Ã negativo?

4 A Eq. 3-2 mostra que a soma de dois vetores i e *b* é comutativa . Isso significa que a subtração é comutativa, ou seja, que

i-b =b-i?

5 Quais dos sistemas de eixos da Fig. 3-23 são sistemas de coordenadas dexrogiros? Como de costume, a letra que identiica o eixo está no semieixo positivo.

6 Descreva dois vetores i e *b* tais que

(a) *ã +E*= e e *a* + *b* = e;

Figura 3-25 Pergunta 10.

-

-

(b) i + b = a-b;

(c) ã +*b* = e e *a2* + *b2* = *c2*•

-

-

-

-

7 Se *d* = ã + *b* +(-e), é verdade que (a) ã +*(- d)*= *e* + *(-b)*, (b) ã = *(- b)*+*d* + e e (c) e + *(- d)* = *i*+*b?*

P R O B L E M A S

1

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adici onais disponíveis em O *Cico Voador da Ffsi.* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 3-4 Componentes de Vetores

que representa este movimento. b) Que distância e (c) em que di

•1 Quais são (a) a componente *x* e (b) a componente *y* de um vetor reção voaria um pássaro em linha reta do mesmo ponto de partida

***ã* do plano *y* que faz um ângulo de 250º no sentido ani-horário ao mesmo ponto de chegada?**

com o semieixo x positivo e tem um módulo de 7 ,3 m?

•9 Dois vetores são dados por

•2 Um vetor deslocamento *r* no plano *y* tem 15 m de comprimento

-

'

A

A

e faz um ângulo 8 = 30º com o semieixo *x* positivo, como mostra

***a* - (4.0 n1)i - (3,0 1)j + (1,0 n1)k**

a Fig. 3 -26. Determine (a) a componentex e (b) a componente *y* do e *b* = (1,0 ni)i [illegible] (1,0 m)J + (4.0 m)k.

vetor.

Determine, em termos de vetores unitários, (a) ã + b; (b) ã -b; (c)

y

um terceiro vetor, ê, al que ã-b +ê = O.

•10 Determine as componentes (a) *x*, (b) *y* e (c) *z* da *soma r* dos deslocamentos ê e d cujas componentes em metros ao longo dos

Figura 3-26 Problema 2.

-- - -

-

-

- *x*

três eixos são e, = 7,4, cY = -3,8, e, =-6,1, d, = 4,4, dY =-2,0,

***d*, = 3,3.**

•3 A componente *x* do vetor Ã é -25,0 m e a componente *y* é +40,0 • 11 (a) Determine a soma ã + *E*, em termos de vetores unitários, m. (a) Qual é o módulo de Ã? (b) Qual é o ângulo entre a orientação para *ã* = (4,0 m)i + (3,0 m)] e *E*= (-13,0 m)i + (7,0 m)] . Deterde Ã e o semieixo x positivo?

mine b) o módulo e (c) a orientação de *ã* + *E*.

•4 Expresse os seguintes ângulos em radianos: (a) 20,0º; (b) 50,0º; •12 Um carro viaja 50 km para leste, 30 m para o norte e 25 m (c) 100º . Converta os seguintes ângulos para graus: (d) 0,330 rad; em uma direção 30° a leste do norte. Desenhe o diagrama vetorial (e) 2,10 rad; (f) 7,70 rad.

e determine (a) o módulo e (b) o ângulo do deslocamento do carro

•5 O objetivo de um navio é chegar a um porto situado 120 m ao em relação ao ponto de partida.

norte do ponto de partida, mas uma tempestade inesperada o leva •13 Uma pessoa deseja chegar a um ponto que está a 3,40 m para um local siuado 100 m a leste do ponto de partida. (a) Que de sua localização atual, em uma direção 35,0º ao norte do leste.

distância o navio deve percorrer e (b) qual o rumo deve tomar para As ruas por onde pode passar são todas na direção norte-sul ou na chegar ao desino?

direção leste-oeste . Qual é a menor disância que a pessoa precisa

•6 Na Fig. 3-27, uma máquina pesada é erguida com o auxilio de percorrer para chegar ao destino?

uma rampa que faz um ângulo 8 = 20,0º com a horizontal, na qual •14 Você deve executar quaro deslocamentos sucessivos na sua máquina percorre uma distância d = 12,5 m. (a) Qual é a distância perfície plana num deserto, começando na origem de um sistema vertical percorrida pela máquina? (b) Qual é a distância horizontal de coordenadas *y* e terminando nas coordenadas (-140 m, 30 m).

percorrida pela máquina?

As componentes dos seus deslocamentos são, respectivamente, as

seguintes, em metros: (20, 60), (b, -70), (-20, *cy)* e (-60, -70).

Determine (a) b . e (b) *c1*• Determine (c) o módulo e (d) o ângulo

(em relação ao semieixo x positivo) do deslocamento total.

•15 Os vetores ã e E da Fig. 3-28 têm o mesmo módulo, 10,0 m,

e os ângulos mostrados na igura são *81* = 30º e *82* = 105º. D e termine as componentes (a) x e (b) *y* da soma vetorial *r* dos dois vetores, (c) o módulo de r e (d) o ângulo que r faz com o semieixo

Figua 3-27 Problema 6.

x positivo.

••7 As dimensões de uma sala são 3,00 m (altura) X 3,70 m X 4,30

y

m. Uma mosca parte de um canto da sala e pousa em um canto diagonalmente oposto. (a) Qual é o módulo do deslocamento da mosca?

b) A distância prcorrida pode ser menor que ese valor? (c) Pode

ser maior? (d) Pode ser igual? (e) Escolha um sistema de coordenadas apropriado e expresse as componentes do vetor deslocamento em termos de vetores unitários. (f) Se a mosca caminhar, em vez

de voar, qual é o comprimento do camnho mais curto para o ouro

canto? *(Sugesão:* o problema pode ser resolvido sem fazer cálculos

complicados . A sala é como uma caixa; desdobre as paredes para re

Q - -_

_

_

_

_

__ X

presená-las em um mesmo plano antes de procurar uma solução.)

Figura 3-28 Problema 15.

Seção 3-6 Soma de Vetores a partir das Componentes

A

A

-

A

•16 Para os vetores ã = (3,0 m)i +(4,0 m)j e b = (5,0 m)i +

•8 Uma pessoa caminha da seguinte forma: 3, 1 m para o norte, 2,4

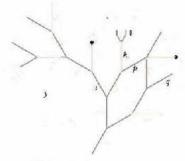
A

-

(- 2, O m)j , determine ã + *b* (a) em termos de vetores unitários e em

m para oeste e 5,2 m para o sul. (a) Desenhe o diagrama vetorial

A

termos b) do módulo e (c) do ângulo (em relação a i). Determine

respectivamente. Determine (a) direção 30º ao norte do leste. O besouro 2 corre 1,6 m em uma dio módulo e (b)_o ânulo do vetor *ã* +b + *e* e (c) o módulo e (d) o reção 40º ao leste do norte e depois corre em oura direção. Quais ânulo de ã *-b* + ê. Determine (e) o módulo e (f) o ânulo de um devem ser (a) o módulo e (b) o senido da segunda corrida do seunquarto vetor, *d,* tal que *(ã + b)-(c +d)* = O.

- - -

-

do besouro para que ermine na mesma posição final que o primeiro

•18 Na soma *A*+ *B* = *C,* o vetor *A* tem um módulo de 12,0 m e besouro?

faz um ângulo de 40,0º no sentido antihorário com o semieixo *x* ••29

- Para se orientarem, as formigas de jardim costumam

positivo; o vetor C tem um módulo de 15,0 m e faz um ângulo de criar uma rede de ilhas marcadas por feromônios. Partindo do 20,0º no sentido ani-horário com o semieixo *x* negativo. Determine formigueiro, cada uma dessas trilhas se *bfurca* repetidamente em (a) o módulo de *B* e (b) o ângulo de *B* com o semieixo *x* positivo. duas trilhas que formam um ângulo de 60º. Quando uma formiga

•19 Em um jogo de xadrez ao ar livre, no qual as peças ocupam perdida enconra uma rilha, pode saber em que direção fica o foro centro de quadrados com 1,00 m de lado, um cavalo é movido miueiro ao chegar ao primeiro ponto de bifurcação. Se esiver se da seguinte forma: (1) dois quadrados para a frente e um quadrado afastando do formigueiro, enconrará duas trilhas que formam ânpara a direita; (2) dois quadrados para a esquerda e um quadrado gulos pequenos com a direção em que estava se movendo, 30º para para a frente; (3) dois quadrados para a frente e um quadrado para a esquerda e 30º para a direita. Se estiver se aproximando do fora esquerda. Determine (a) o módulo e (b) o ân miueiro, encontrará apenas uma trilha com essa caracterísica, 30"

ulo (em relação ao

sentido "para a rente") do deslocamento toal do cavalo após a série para a esquerda ou 30" para a direita. A Fig. 3-29 mostra uma rede de rês movimentos.

-

de rilhas típica, com segmentos de rea de 2,0 cm de comprimento

e bifurcações simétricas de 60". Trajetória *v* é paralela ao eixo *y.*

••20

Um explorador polar foi surpreendido por ua n e - Determine (a) o módulo e (b) o ângulo (em relação ao semieixo *x* vasca, que reduziu a visibilidade a praticamente zero, quando re positivo) do deslocamento até o formiueiro (enconre-o na figura) tornava ao acampamento. Para chegar ao acampamento, deveria ter de uma formiga que entra na rede de trilhas no ponto *A*. Determine caminhado 5,6 km para o norte, mas, quando o tempo melhorou, (c) o módulo e (d) o ângulo de uma formiga que enra na rede de percebeu que na realidade havia caminhado 7 ,8 km em uma direção trilhas no ponto *B.*

50º ao norte do leste. (a) Que distância e (b) em que sentido deve

caminhar para voltar à base?

••21 Uma formiga, enlouquecida pelo Sol em um dia quente, sai

b

ulo (em relação ao semieixo *x* positivo) do deslocamento total.

s

••22 (a) Qual é a soma dos quaro vetores a seguir em termos de

L *V*

vetores unitários? (b) Para essa soma, quais são (b) o módulo, (c) o

X

t

u

ânulo em graus, e (d) o ânulo em radianos?

- ·

w

***E:* 6,00 m e +0,0 rad**

F: 5.0 m e -75,0º

ê: 4,00 m e + 1.20 rad

Figura 3-29 Problema 29.

***H:* 6.00 m e 21°**

-

-

A

A

••23 Se *B* é somado a *C* = 3, Oi + 4, O j , o resultado é um vetor • •30 São dados dois vetores: com a orientação do semieixo *y* posiivo e um módulo iual ao de

e.* Qual é o módulo de *B?

â = (4,0 m)i - (3,0 n1)J e *b* = (6.0 m)1 + (8.0 m)J.

••24 O vetor Ã, paralelo ao eixo *x,* deve ser somado ao vetor B, Determine (a) o módulo e b) o ângulo [illegible] relação a i) de *ã.* D e -

que tem um módulo de 7,0 m. A soma é um vetor paralelo ao eixo termine (c) o módulo e (d) o ânulo de *b.* Determine (e) o módulo

***y,* com um módulo 3 vezes maior que o de *Ã.* Qual é o módulo de e () o ângulo de *ã + b;* (g) o módulo e (h) o ângulo de *b - ã;* (i) Ã?**

o módulo e U) o ângulo de *ã - b.* (k) Determine o ânulo entre as

• •25 O oásis *B* está 25 m a leste do oásis *A.* Partindo do oásis *A,* direções *deb-ã eã-b.*

um camelo percorre 24 m em uma direção 15º ao sul do leste e • ••31 Na Fig. 3.30, um cubo de aresta *a* tem um dos vértices po8,0 m para o norte. A que distância o camelo está do oásis *B?*

sicionado na origem de um sistema de coordenadas *yz.* A *diagonal*

••26 Determine a soma dos quatro vetores a se

***do cubo* é uma reta que vai de um vértice a outro do cubo, passando**

uir (a) em termos

dos vetores unitários e em termos (b) do módulo e (c) do ângulo.

-

pelo cenro. Em termos dos vetores unitários, qual é a diagonal do

cubo que passa pelo vértice cujas coordenadas são (a) (0, O, O), (b)

Ã = (2.00 m)I + (3.00 m)}

B: 4,0 m e +65.0º

***(a,* O, O) (c) (0, *a,* O) e (d) *(a, a,* O)? (e) Determine os ângulos que as diagonais do cubo fazem com as arestas vizinhas. (f) Determine o**

C = (-4,00 m)t + (-6,0 m)j 5: 5,00 1n e -23,5º

comprimento das diagonais de cubo em termos de *a.*

z

Ã = 2,00Í + 3,00J - 4,0k

--

.

.

.

B **= -3,00i + 4,00j + 2,00k** ***e = 1,oT*** **- s.o1**

a

• •39 O módulo do vetor ***Ã*** **é 6,00 unidades, o módulo do vetor** ***B***

--

-

-y

'-J V a

é 7,00 unidades e Ã · ***B*** **= 14,0. Qual é o ângulo enre** ***Ã*** **e** ***B?***

a

X

••40 O deslocamento d ***1*** **está no plano yz, faz um ângulo de 63,00**

Figura 3-30 Problema 31.

com o semieixo ***y*** **positivo, tem uma [illegible] z positiva e tem**

um módulo de 4,50 m. O deslocamento ***d2*** **está no plano** ***z,*** **faz um Seção 3-7 Vetores e as Leis da Física**

ângulo de 30,0º com o semieixo ***x*** **positivo, tem uma [illegible]

Seção 3-8 Multiplicação de Vetores

•33 Para os vetores da Fig. 3-32, com *a* = 4, *b* = 3 e *e* = 5, determine (a) o módulo e (b) a orientação de *ãXb,* (c) o módulo e (d) a orienação de ã X *e* e (e) o módulo e () orientação de *b* X ê.

(Embora exista, o eixo z não é mostrado na iura.)

Figura 3-33 Problema 43.

-

••44 No produto F = *qv* X B, faça *q* = 2,

-

b

***v* = 2,0T + 4,0j + 6,0k e**

.

.

.

***F* = 4,0i - 20j + 12k.**

-

Determine B, em termos dos vetores unitários, para B, = BY .

a

Problemas Adicionais

Figura 3-32 Problemas 33 e 54.

45 Os vetores Ã e *B* estão no plano *xy.* Ã tem módulo 8,00 e ângulo A

A

-

A

A

•34 Dois vetores são dados por *ã* = 3,0i + 5,0j e *b* = 2,0i +4,0j. 1300; *B* tem componentesBx = -7,72 eBY = -9,20. (a) Determine Determine (a) ã *Xb,* (b) *ã · b,* (c) *(ã +b) · E* e (d) a componente de 5Ã · B. Determine 4Ã X 3B b) em termos dos vetores unitários e

***ã* em relação a b. *[Sugestão:* para resolver o item (d), considere a (c) através do módulo e do ângulo em coordenadas esféricas (veja Eq. 3-20 e a Fig. 3-18.]**

a Fig. 3-34). (d) Determine o ângulo enre os vetores Ã e *4A* X 38.

***(Sugestão:* pense um pouco antes de iniciar os cálculos). Determi-**

•35 Dois vetores, *r* e *s,* estão no plano *y.* Os módulos dos veto

-

A

ne A+ 3, OOk (e) em termos dos vetores unitários e () aravés do

res são 4,50 unidades e 7 ,30 unidades, respectivamente, e eles estão módulo e do ângulo em coordenadas esféricas.

orientados a 320º e 85,0º, respectivamente, no sentido antihorário

em relação ao semieixo *x* positivo. Quais são os valores de (a) *r · s*

z

e (b) rxs?

-

A

A

A

-

A

A

A

-

-

•36 Se *d1* = 3i -2j + 4k e *d2* = -5i + 2j -k, determine *(d,* + d2) •

- -

(d1 X4d2)-

A

A

A

•37 Três vetores são dados por *ã* = 3,0i + 3,0j-2,0k,

-

A

A

PARTE 1

VETORES

59

46 O vetor *ã* tem módulo 5,0 m e aponta para leste. O vetor *b* tem 53 Um vetor *ã* de módulo 10 unidades e outro vetor *b* de módulo módulo 4,0 m e apona na dirção 35° a oeste do norte. Determi 6,0 unidades fazem um ângulo de 60°. Determine (a) o produto esne (a) o módulo e (b) a orientação do vetor ã + b. Determine (c) o calar dos dois vetores e (b) o módulo do produto vetorial *ã* X E.

módulo e (d) a orientação do vetor *b-ã.* (e) Desenhe os diagramas 54 Para os vetores da Fig. 3.32, com *a* = 4, *b* = 3 e *e* = 5, calcule vetoriais correspondentes às duas combinações de vetores.

(a) ã·b, (b) ã · c e (c) E -e.

47 Os vetores Ã e B estão no plano *y.* Ã tem módulo 8,00 e ângulo 55 Uma partícula sofre três deslocamentos sucessivos em um pla130°; B tem componentes Bx = -7,72 e BY = -9,20. Determine o no: *d* ângulo entre o semieixo y negativo e (a) o vetor Ã, (b) o vetor Ã X B

***1* , 4,00 m para sudoeste, *d2,* 5,00 para leste, e d3, 6,00 em uma**

-

·-

"

direção 60,00 ao norte do leste. Use um sistema de coordenadas com

e (c) o vetor *A* X *(B* + 3,00k).

o eixo *y* apontando para o norte e o eixo *x* aponando para leste. D e 48 Dois vetores *ã* e *b* têm componentes, em metros, ax = 3,2, termine (a) a componentexe (b) a componente *y* de J1• Determine (c) aY = 1,6, bx = 0,50 e bY = 4,5. (a) Determine o ângulo entre ã e *E.* a componenexe (d) a componente yde d *2*• Determine (e) a compo

Existem dois vetores no plano *y* que são perpendiculares a *ã* e têm nente *x* e () a componente *y* de d3• Considere o deslocamento *total* da um módulo de 5,0 [illegible] Um, o vetor ê, tem uma componente *x* positi partícula aps os três deslocamentos. Determine (g) a componente *x,*

va; o outro, o vetor *d* , tem uma componente *x* negativa. Determine (h) a componente y, (i) o módulo e (j) a orientação do deslocamento (b) a componente *x* e (c) a componente *y* de e; (d) a componente *x*

-

total. Para que a partícula volte ao ponto de partida (k) que disância

e (e) a componente *y* de *d.*

deve percorrer e (1) em que direção deve se deslocar?

49 Um barco a vela parte do lado norte-americano do lago Erie 56 Determine a soma dos quaro vetores a seguir (a) em termos para um ponto no lado canadense, 90,0 km ao norte. O navegan dos vetores unitários e em termos (b) do módulo e (c) do ângulo em te, contudo, termina 50,0 km a leste do ponto de partida. (a) Que relação ao semieixo *x* posiivo.

distância e (b) em que dirção deve navegar para chegar ao ponto

P:* 10,0 m, 25,0°, sentido antihorário em relação a + *x

desejado?

Q: 12,0 m, 10,0°, sentido antihorário em relação a +*y*

50 O vetor d, é paralelo ao semieixo *y* negativo e o vetor d *2* é earalelo ao [illegible] *x* positivo. Determine a [illegible] (a) de

***R:* 8,00 m, 20,0°, sentido horário em relação a -y**

***d2!4* e (b) de *-d, 14.* Determine o módulo (c) de d1 • *d2* e (d) de S: 9,00 m, 40,0°, senido anti -horário em relação a -y**

d

-

-

"

"

-

1 · *(d2* / 4). Determine a orientação (e) do vetor *d,* X *d2* e (f) do vetor 57 Se *B* é somado a *A,* o resulado é 6, Oi + 1, O j. Se *B* é subraído *d2* X d *1*• Determine o módulo (g) de *d,* _ *d2* e ih) de *d2* X *d,* . Deter

-

A

A

-

de A, o resultado é -4,0i +7,0j. Qual é o módulo de A?

mine (i) o módulo e j) a orientação de d1 X (d2/4).

58 Um vetor d tem módulo 2,5 m e aponta para o norte. Determine

51 Uma *falha geológica* é uma ruptura ao longo da qual faces (a) o módulo e (b) a orienação de *4,0d.* Determine (c) o módulo e opostas de uma rocha deslizaram uma em relação à outra. Na Fig. (d) a orientação de -3,0d.

3-35, os pontos *A* e *B* coincidiam antes de a rocha em primeiro pla-

-

no deslizar para a direia. O deslocamento total *AB* está no plano da

-

59 O vetor Ã tem um módulo de 12,0 m e faz um ângulo de 60,00

falha. A [illegible] horizonal de *AB* é o *rejeito horizontal AC.* A no sentido antihorário com o semieixo *x* positivo de um sistema

-

A

A

componente de *AB* dirigida para baixo no plano da falha é o *rejeito*

- de coordenadas *y.* O vetor *B* é dado por (12,0 m)i + (8,00 m)j no *e mergulho AD.* (a) Qual é o módulo do deslocamento total *AB* mesmo sistema de coordenadas. O sistema de coordenadas sofre se o rejeito horizontal é 22,0 m e o rejeito de mergulho é 17,0 m? uma rotação de 20,00 no sentido antihorário em torno da origem (b) Se o plano da falha faz um ângulo p = 52,0º com a horizontal, para formar um sistemax'y'. Determine os vetores (a) Ã e (b) *B em*

qual é a componente vertical de *AB?*

termos dos vetores unitários do novo sistema.

3,0j +2,0k. (b) Calcule o ângulo enre r e o seiieixo z positivo.

(c) Determine a componente de *ã* em relação a *b.* (d) Determine [illegible] -a componente de *ã* em uma direção perpendicular a *b,* no plano de mergulho

deinido por *ã* e b. *[Sugestão:* para resolver o item (c), veja a Eq.

3-20 e a Fig. 3-18; para resolver o item (d), veja a Eq. 3 -27.]

62 Um jogador de golfe precisa de três tacadas para colocar a bola

Plano de falha

no buraco. A primeira tacada lança a bola 3,66 m para o norte, a

Figua 3-35 Problema 51.

segunda 1,83 m para sudeste e a terceira 0,91 m para sudoeste . D e termine (a) o módulo e (b) a direção do deslocamento necessário para colocar a bola no buraco na primeira tacada.

-

A

A

52 São dados três deslocamentos em metros: *d,* = 4,0i + 5,0 j -

[illegible]

63 São dados rês vetores em metros:

***2* = -1,0i +2,0j + 3,0ke d3 = 4,0i + 3,0 J + 2,0k (a) Determine r = J1 -J2 + J3. (b) Determine o ângulo enre r e o semieid, xo *z* positivo. (c) Determine a componente de J**

= -3,0, -1-3,0j + 2,0k

1 em relação a d *2*•

(d) Qual é a componente de d

d

1 que é perpendicular a d *2* e está no

***2* = -2,0i - 4,0j + 2,0k**

plano de d, e d *2? [Sugestão:* para resolver o item (c), considere a

d,

Eq. 3-20 e a Fig. 3-18; para resolver o item (d), considere a Eq.

= 2,l + 3,0J + 1,0k.

3-27.]

Determine (a) *d1* ·(d2 + d3), (b) d ·*(d*

1

***2* Xd3 e (c) d, *X(d2* +d3).**

64 Considere dois deslocamentos, um de módulo 3 m e outro de se desloca 40 m no sentido negativo do eixo *x*, faz uma curva de módulo 4 m. Mosre que os vetores deslocamento podem ser com noventa graus à esquerda, caminha mais 20 m e sobe até o alto de binados para produzir um deslocamento de módulo (a) 7 m, (b) 1 m uma torre com 25 m de altura. (a) Em termos de vetores unirios, e (c) 5 m.

qual é o deslocamento da placa do início ao im? (b) O manifestante

65 Um manifestante com placa de protesto parte da origem de deixa cair a placa, que vai parar na base da torre. Qual é o módulo um sistema de coordenadas *yz,* com o plano *y* na horizontal. Ele do deslocamento total, do início até este novo im?

y
(5 m)k̂
(2 m)ĵ
(−3 m)î
x
O
r⃗

CA P Í T U LO

M OV I M E NTO E M

\

D UAS E TRES

D I M E N SO E S

- O QUE É FÍSICA?

Neste capítulo, coninuamos a estudar a parte da física que analisa o movimento, mas agora os movimentos podem ser em duas ou rês dimensões. Médicos e engeheiros aeronáuicos, por exemplo, precisam conhecer a ísica das curvas realizadas por pilotos de caça durante os combates aéreos,já que os jatos modernos fazem curvas tão rápidas que o piloto pode perder momentaneamente a consciência. Um

engeheiro esporivo alvez esteja interessado na física do basquetebol. Quando um

jogador vai cobrar um *.nce livre* (em que o jogador lança a bola em direção à cesa, sem marcação, de uma distância de 4,3 m), pode aremessar a bola da altura dos ombros ou da altura da cintura. A primeira técnica é usada pela maioria esmagadora

dos jogadores proissionais, mas o legendário Rick Barry estabeleceu o recorde de

aproveitamento de lances livres usando a segunda.

Não é fácil compreender os movimentos em rês dimensões. Por exemplo, o leitor provavelmente é capaz de dirigir um caro em uma rodovia (movimento em uma dimensão), mas teria muita diiculdade para pousar um avião (movimento em rês dimensões) sem um reinamento adequado.

Iniciaremos nosso estudo do movimento em duas e rês dimensões com as definições de posição e deslocamento.

4-2 Posição e Deslocamento

A localização de uma parícula (ou de um objeto que se comporte como uma par

Distância ao

tícula) pode ser especiicada, de forma geral, aravés do vetor posição *r*, um vetor

longo do

que liga um ponto de referência (a origem de um sistema de coordenadas, na maio

-

-

-eixoz.

ria dos casos) à parícula. Na notação de vetores unitários da Seção 3-5, *r* pode ser

escrito na forma

Distância ao

.

[illegible]

'

'

.

- longo do

r

e

= *xi* + *yj* + *zk*,

(4-1)

ixo *y*.

Distância ao

A

A

A

onde xi, *y* j e zk são as componentes vetoriais de *r* e *x*, *y* e *z* são as componentes longo do

escalares.

eixo *x*.

Os coeficientes *x*, *y* e *z* fonecem a localização da parícula em relação à oigem ao longo dos eixos de coordenadas; em ouras palavras, *(x, y, z)* são as coordenadas retangulares da partícula. A Fig. -1, por exemplo, mosra uma parícula cujo vetor posição é

.

.

.

***r* = (-3 m)i + (2 m)j + (5 m)k**

e cujas coordenadas retangulares são (-3 m, 2 m, 5 m). Ao longo do eixo *x*, a par-

%

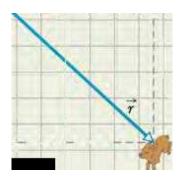
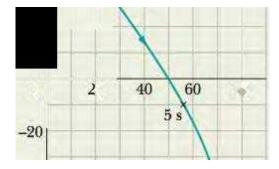
tícula está a 3 m da origem, no senido oposto ao do vetor unitário i. Ao longo do Figua 4-1 O vetor posição r de A

eixo *y*, está a 2 m da origem, no sentido do vetor unitário j. Ao longo do eixo *z*, está uma pícula é a soma vetorial das a 5 m da origem, no sentido do vetor unitário k.

componentes vetoriais.

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

$$\Delta\vec{r} = (x_2\hat{\mathrm{i}} + y_2\hat{\mathrm{j}} + z_2\hat{\mathrm{k}}) - (x_1\hat{\mathrm{i}} + y_1\hat{\mathrm{j}} + z_1\hat{\mathrm{k}})$$

$$\Delta\vec{r} = (x_2 - x_1)\hat{\mathrm{i}} + (y_2 - y_1)\hat{\mathrm{j}} + (z_2 - z_1)\hat{\mathrm{k}},$$

Quando uma partícula se move, o vetor posição varia de tal forma que sempre

liga o ponto de referência (origem) à partícula. Se o vetor posição varia de i para fi,

digamos, durante um certo intervalo de tempo, o deslocamento da partícula, ir,

durante esse intervalo de tempo é dado por

(4-2)

Usando a notação de vetores unitários da Eq. 4-1, podemos escrever este deslocamento como

ou como

(4-3)

onde as coordenadas *(x,,* Yi*, z,)* correspondem ao vetor posição i e as coordenadas *(x2, y2, zz)* corespondem ao vetor posição i. Podemos também escrever o vetor deslocamento subsituindo (z - *x,)* por ix, y2 - *y1)* por *.y* e (z2 - *zi)* por z:

. . . .

lr* = xi + *lyj* + *lzk.

(4-4)

Exemplo

Vetor posição bidimensional: movimento de um coelho

Um coelho aravessa um estacionamento, no qual, por al *Cálculos* Podemos escrever guma razão, um conjunto de eixos coordenados foi desenhado. As coordenadas da posição do coelho, em meros, *r(t)* = x(t)i + y(t)j.

(4-7)

em função do tempo *t,* em segundos, são dadas por

[Escrevemos *r (t)* em vez de *r* porque as componentes são

funções de t e, portanto, *r* ambém é função de *t.]*

***X* = -0,3lt1 + 7,2t + 28**

(4-5)

Em t = 15 s, as componentes escalares são

e

***y* = 0,22t2 - 9,lt + 30.**

(4-6)

***X* = (-Q,31)(15)L + (7,2)(15) + 28 = 66 i**

(a) No instante *t* = 15 s, qual é o vetor posição *r* do co e *y* = (0,22)(15)2 - (9,1)(15) + 30 = -57 m, elho na notação de vetores unitários e na notação módulo-ângulo?

donde

7 = (66 m)Í - (57 m)J, (Resposta)

que está desenhado na Fig. *4-2a.* Para obter o módulo e o

IDEIA-CHAVE

ângulo de r, usamos a Eq. 3-6:

As coordenadas *x* e *y* da posição do coelho, dadas pelas

Eqs. 4-5 e 4-6, são as componentes escalares do vetor

***r* = Vx2 + *y2* = V(66 m)2 + (-57 m)2**

posição *r* do coelho.

= 87 n1,

pontos. Podemos também plotar a curva em uma calculadora gráica a parir das Eqs. 4-5 e 4-6.

4-3 Velocidade Média e Velocidade Instantânea

Se uma parícula se move de um ponto para outo, podemos estar interessados em saber com que rapidez a partícula está se movendo. Como no Capítulo 2, podemos deinir duas grandezas que expressam a "rapidez" de um movimento: ***velociade édia*** **e** ***velociade instantânea.*** **No caso de um movimento bidimensional ou tidimensional,**

porém, devemos considerar essas randezas como vetores e usar a noação vetorial.

Se uma partícula sore um deslocamento .r em um intervalo de tempo .t, a

veloidade média v md é dada por

deslocamento

velcidade média = - - - - - -intervalo de te111po'

ou

-

. 7

V éd = _t •

(4-8)

Esta equação nos diz que a orientação de v d (o vetor do lado esquerdo da Eq.

mé

4-8) deve ser igual à do deslocamento .r (o vetor do lado direito). Usando a Eq. 4-4,

podemos escrever a Eq. 4-8 em termos das componentes vetoriais:

.

.xi + .yj + .zk

âx • .y [illegible] .z kA

1, -

- -- 1 +

lf -

J +

'.

./

ili

.1

i{

(4-9)

A

A

Assim, por exemplo, se uma partícula sofre um deslocamento de (12 m)i + (3,0 m)k

em 2,0 s, a velocidade média durante esse movimento é

Quando falamos da velocidade de uma partícula, em geral estamos nos referindo

se move, o vetor

à velocidade instantânea *v* em um certo instante. Esta velocidade *v* é o valor para posição muda.

y

o qual tende a velocidade v éd quando o intervalo de tempo .t tende a zro. Usando

m

Tangente

a linguagem do cálculo, podemos escrever *v* como a derivada

_ *dr*

***V* =**

(4-10)

***dt* .**

**A Fig. 4-3 mosra a rajetória de uma partícula que se move no plano y. Quando a parícula se desloca para a direita ao longo da curva, o vetor posição gira para [illegible]

–

–

–

–

–

–

–

–

—

X

Q

a direita. Durante o intervalo de tempo .t, o vetor posição muda de i para *i* e o

deslocamento da partícula é .r.

Figua 4-3 O deslocamento ir de uma

Para determinar a velocidade instanânea da parícula no instante *t*

partícula durante um intervalo de tempo

***1* (insante em**

que a parícula se enconra na posição 1), reduzimos o intervalo de tempo .t nas it, da posição 1, com vetor posição i no instante t

vizinhanças de

i, até a posição 2, com

***t1*, fazendo-o tender a zero. Ao fazermos isso, rês coisas acontecem: vetor posição *r* (1) O vetor posição *i* da Fig. 4-3 se aproxima de i, fazendo .r tender a zero. (2)**

***2* no instante *t2*• A figura**

mosra ambém a tangente à trajetória da

A direção de .r/.t (e, poranto, de vmd) se aproxima da direção da reta tangente à partícula na posição 1.

$$\vec{v} = v_x\hat{\mathrm{i}} + v_y\hat{\mathrm{j}} + v_z\hat{\mathrm{k}},$$

rajetória da partícula na posição 1. (3) A velocidade média iméd se aproxima da velocidade instantânea *v* no instante t1•

No limite *lt* - O, temos iméd - i e, o que é mais importante nesse contexto,

iméd assume a direção da reta tangente. Assim, *v* também assume essa direção:

A direção da velocidade instantânea v de uma partícula é sempre tangente à rajetória da parícula na posição da partícula.

O resulado é o mesmo em três dimensões: i é sempre tangente à rajetória da par

ícula.

Para escrever a Eq. 4-10 na forma de vetores uniários, usamos a expressão para

y

dt ' e *v.* =

<

dt "

Assim, por exemplo, *x/dt* é a componente escalar de *v* em relação ao eixo *x.* Isso signiica que podemos enconrar as componentes escalares de v derivando as componentes de *r.*

A Fig. 4-4 mosra o vetor velocidade *v* e as componentes escalares *x* e *y.* Note que *v* é tangente à rajetória da parícula na posição da parícula. *Atenção:* um vetor posição, como os que aparecem nas Figs. 4-1 a 4-3, é uma seta que se estende de

um ponto ("aqui") a ouro ("lá"). Entretanto, um vetor velocidade, como o da Fig.

4-4, *não se estende* de um ponto a ouro. No caso do vetor velocidade, a orientação

do vetor é usada para mosrar a direção instantânea do movimento de uma partícula

localizada na origem do vetor; o comprimento, que representa o módulo da velocidade, pode ser desenhado em qualquer escala.

"TESTE 1

y

A igura mostra uma rajetória circular descrita por

uma partícula. Se a velocidade da parícula em um

A

A

certo insante é i = (2 m/s)i - (2 m/s)j, em qual dos

quadrantes a partícula está se movendo nesse insante se o

movimento é (a) no sentido horário e (b) no sentido antihorário?
Desenhe i na iura para o s dois casos.

O vetor velocidade é

sempre tangente à trajetória.

y

Tangente}

------- 1 Estas são as componentes

***x* e *y* do vetor velocidade**

neste instante.

Figua 4-4 A velocidade i de uma

partícula e as componentes escalares

[illegible]

de i.

***o* -- - - - - - -**

- *x*

–40

–60

$$\frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$$

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

65

Exemplo

Velocidade bidimensional de um coelho

Detrine a velocidade *v* do coelho do exemplo anterior

no instante *t* = 15 s.

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(-2,1\ m/s)^2 + (-2,5\ m/s)^2}$$

$$= 3,3\ m/s$$

'

**Y [illegible]

= -*0,62t* + 7,2.

(4-13)

40

Em t = 15 s, isso nos dá vx = -2,1 m/s. Da mesma forma,

aplicando a parte da Eq. 4-12 correspondente a vy à Eq.

4-6, descobrimos que a componente *y* é

o

X (m)

80

***v*,. = d(= d**

d (0,22t2 - 9,1, + 30)

•

< *l*

l

-20

= 0,44t - 9,1.

(4-14)

Em *t* = 15 s, isso nos dá v =

Y

-2,5 m/s. Assim, de acordo

com aEq. 4-11,

,-x

' = (-2,1 tn/s)i + (-2,5 m/s)J,

[illegible]

que está desenhada na Fig. 4-5, tangente à rajetória do

[illegible] [illegible] .'**

_ 130º

1

Estas são as componentes

coelho e na direção em que o animal está se movendo em

x e *y* da velocidade neste

***t* = 15 s.**

instante.

Para obter o módulo e o ângulo de *v*, podemos usar

uma calculadora ou escrever, de acordo com a Eq. 3-6,

Figura 4-5 A velocidade i do coelho em *t* = 15 s.

4-4 Aceleração Média e Aceleração Instantânea

Quando a velocidade de uma partícula varia de *v1* para i2 em um intervalo de tempo

Se o módulo *ou* a orientação da velocidade varia (ou ambos variam), a partícula

possui uma aceleração.

Podemos escrever a Eq. 4-16 em temos de vetores unitários substituindo v pelo

seu valor, dado pela Eq. 4-11, para obter

escalares de v em relação ao tempo.

A Fig. 4-6 mosra o vetor aceleração ã e suas componentes escalares para uma

partícula que se move em duas dimensões. *Atenção:* um vetor aceleração, como

o da Fig. 4-6, *não se estende* de um ponto a ouro. No caso do vetor aceleração, a

orientação do vetor é usada para mostrar a direção instantânea da aceleração de uma

parícula localizada na origem do vetor; o comprimento, que representa o módulo da

aceleração, pode ser desenhado em qualquer escala.

TESTE 2

Considere as seguintes descrições da posição (em metros) de uma partícula que se move

no plano y:

()) *X* = -3/2 - 4/ - 2 e *y* = *6t2* - *4t* (3) : = 2t2i - (41 + 3)j (2) x = -31ô - 41 e *y* = -512 + 6

(4) ; = (41' - 2t)1 + 31

As componentes *x* e *y* da aceleração são constantes em todas essas situações? A aceleração *ã* é consante?

Exemplo

Aceleraão bidimensional de um coelho

Determine a aceleração *ã* do coelho dos exemplos ante Vemos que essa aceleração não varia com o tempo (é riores no instante *t* = 15 s.

constante), pois a variável tempo, t, não aparece na expressão das componentes da aceleração. De acordo com a Eq. 4-17,

IDEIA-CHAVE

Podemos determinar a aceleração ã calculando as deriva

ã = (-0,62 rn/s2)i + (0,44 1n/s2)j, (Resposta)

das das componentes da velocidade do coelho.

que é mosrada superposta à rajetória do coelho na Fig.

4-7.

***Cálculos* Aplicando a parte da Eq. 4-18 correspondente a**

a

Para obter o módulo e o ângulo de ã, podemos usar

x à Eq. 4-13, descobrimos que a componente *x* de ã é

uma calculadora ou a Eq. 3-6. No caso do módulo, te

dv,

d

mos:

2

a. =

(-0,62t

(0.41 **- 9,1) = 0,44 1n/s·.**

= tan

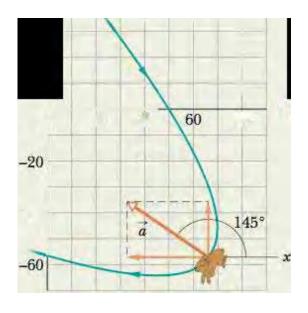
= -35º

= ***dL***

a'

-0 62 m/s2

- ·

'

$$\vec{v}_0 = v_{0x}\hat{\mathrm{i}} + v_{0y}\hat{\mathrm{j}}.$$

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

y (m)

Esse ângulo, que é o resultado fonecido por uma calculadora, indica que a orientação de ã é para a direita e para 40

baixo na Fig. 4-7. Enretanto, sabemos, pelas componentes *x* e y, que a orienação de ã é para a esquerda e para 20

cima. Para determinar o outro ângulo que possui a mesma

tangente que -35°, mas não é mosrado pela calculadora,

O

20

0

X (1n)

SO

somamos 180°:

-35º + 180º = 145º.

(Resposta)

Esse novo resultado *é* compatível com as componentes de

-40

ã. Observe que, como a aceleração do coelho é constante,

Figua 4-7

A aceleração *ã* do

o módulo e a orientação de ã são os mesmos em todos os

coelho em *t* = 15 s.

pontos da rajetória do coelho.

O coelho possui a

mesma aceleração

Estas são as componentes

x

em todos os pontos

e *y* do vetor aceleração

da trajetória.

neste instante.

4-5 Movimento Balístico

Consideraremos a seguir um caso especial de movimento bidimensional: uma

partícula que se move em um plano verical com velocidade inicial v0 e com uma

aceleração constante, igual à aceleração de queda livre *g*, dirigida para baixo. Uma

partícula que se move dessa forma é chamada de projétil (o que significa que é

projetada ou lançada) e o movimento é chamado de movimento balísico. O projéil pode ser uma bola de tênis (Fig. 4-8) ou de pingue-pongue, mas não um avião ou um pato. Muitos esportes (do golfe e do futebol ao lacrasse e ao raquetebol)

envolvem o movimento balísico de uma bola; jogadores e técnicos estão sempre

procurando controlar esse movimento para obter o máximo de vantagem. O jogador

que descobriu a rebaida em Z no raquetebol na década de 1970, por exemplo, vencia os jogos com facilidade porque a rajetória peculiar da bola no fundo da quadra surpreendia os adversários.

-

Vamos agora analisar o movimento balístico usando as feramentas descritas

nas Seções 4-2 a 4-4 para o movimento bidimensional, sem levar em conta a inlu

ência do ar. A Fig. 4-9, que será discutida na próxima seção, mosra a rajetória de Figua 4-8 Fotorafia estroboscópica de uma bola de tênis amarela quicando

um projétil quando o efeito do ar pode ser ignorado. O projéil é lançado com uma em uma superfície dura. Entre os velocidade inicial *v0* que pode ser escrita na forma

impactos, a rajetória da bola é balística.

(4-19) *Fonte:* Richard Megna/Fundamental

Photographs.

As componentes *V* e

x

Voy* podem ser calculadas se conhecermos o ângulo *00* enre *v0

e o semieixo *x* posiivo:

***vr* = *v0* cos 80 e *v0y* = *v0* sen 80 .**

(-20)

Durante o movimento bidimensional, o vetor posição *r* e a velocidade *v* do projétil mudam continuamente, mas o vetor aceleração ã é constante e está *sempre* dirigido

verticalmente para baixo. O projétil *ão possui* aceleração horizontal.

O movimento balísico, como o das Figs. 4-8 e 4-9, parece complicado, mas temos a seguinte propriedade simplificadora (demonsrada experimenalmente): No movimento balístico, o movimento horizontal e o movimento verical são

independentes, ou seja, um não afeta o ouro.

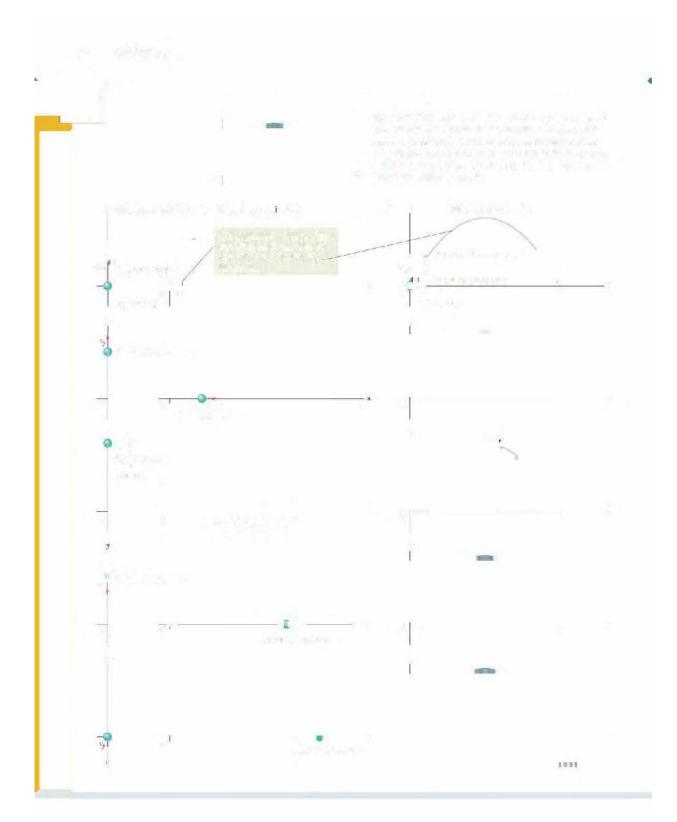
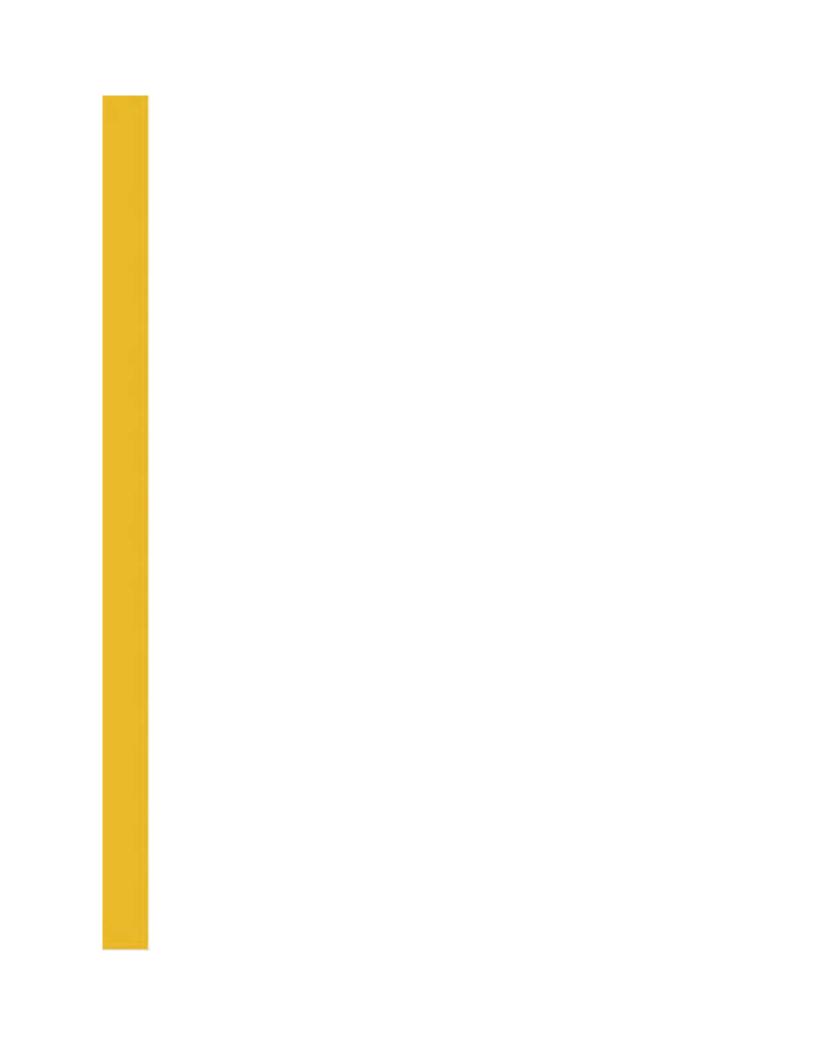
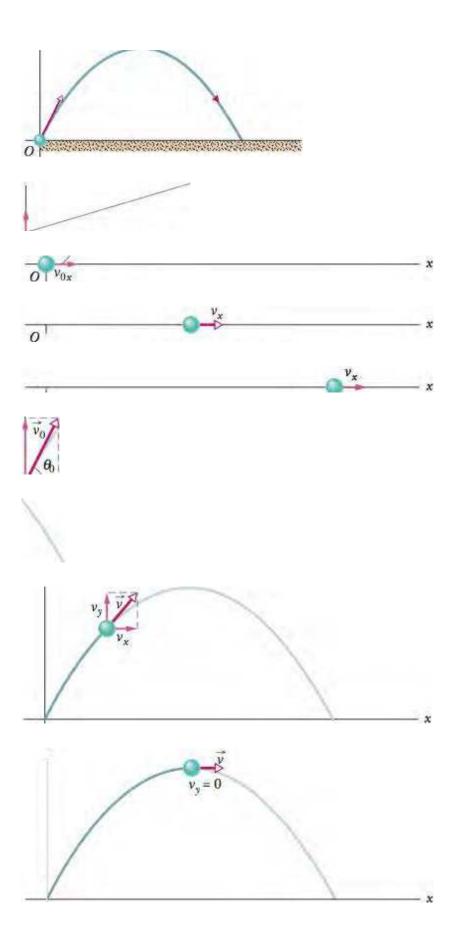
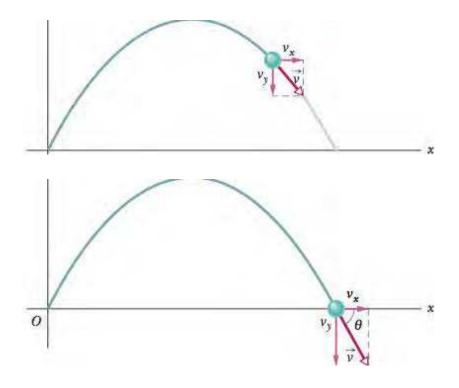
O
O
v_{0x}
x
v_x
x
O
v_x
x
$\vec{v}_0$
θ_0
v_y
$\vec{v}$
v_x
x
$\vec{v}$
$v_y = 0$
x

y

Figura 4-9 O *movimento balístico* de um prjétil lançado

da origem de um sistema de coordenadas com velocidade

inicial v *0* e ângulo 8 *0*• Como mostram as componentes da

velocidade, o movimento é uma combinação de movimento

vertical (com aceleração constante) e movimento horizontal

(com velocidade constante).

-

***Y* Movimento vertical + Movimento horizontal**

'

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

Essa propriedade permite decompor um problema que envolve um movimento bidimensional em dois problemas unidimensionais independentes e mais fáceis de serem resolvidos, um para o movimento horizontal (com *aceleração nula)* e ouro para o

movimento vertical (com *aceleração consante para baio).* Apresentamos a seguir

dois experimentos que mostram que o movimento horizontal e o movimento verical

são realmente independentes.

Duas Bolas de Golfe

A Fig. 4-1 O é uma fotografia esroboscópica de duas bolas de golfe, uma que simplesmente se deixou cair e outra que foi lançada horizontlmente por uma mola. As bolas de golfe têm o mesmo movimento vertical; ambas percorrem a mesma distância vertical no mesmo intervalo de tempo. *O fato de uma bola estar se movendo horizontalmente enquanto está caindo não afeta o movimento vertical,* ou seja, os

movimentos horizontal e vertical são independentes.

Uma Demonstraão Interessante

A Fig. 4-11 mosra uma demonsração que tem animado muitas aulas de física. Um Figura 4-1 O Uma bola é deixada canudo C é usado para soprar pequenas bolas em direção a uma lata suspensa por cair a partir do repouso no mesmo um eleroímã M. O experimento é arranjado de tal forma que o canudo está apontado instante em que oura bola é lançada para a lata e o ímã solta a lata no mesmo instante em que a bola deixa o tubo.

horizontalmente para a direita. Os

Se *g* (o módulo da aceleração de queda livre) fosse zero, a bola seguiria a traje movimentos vericais das duas bolas tória em linha rea mosrada na Fig. 4-11 e a lata continuaria no mesmo lugar após são iguais. *F ante:* Richard Megna/

ter sido liberada pelo eleroímã Assim, a bola certamente aingiria a lata, indepen Fundamenal Photographs.

dentemente da força do sopro.

Na verdade, *g não é* zero, mas, mesmo assim, a bola *sempre atinge a lata!* Como mosra a Fig. 4-11, a aceleração da gravidade faz com que a bola e a lata soram o

A bola e a lata caem à

mesmo deslocamento para baixo, *h*, em relação à posição que teriam, a cada insmesma distância *h*.

tante, se a ravidade fosse nula. Quanto maior a força do sopro, maior a velocidade

inicial da bola, menor o tempo que a bola leva para se chocar com a lata e menor o

valor de *h*.

TESTE 3

Em um certo instante, uma bola que descreve um movimento balísico tem uma

A

A

velocidade *v* = 25i - 4,9 j (o eixo *x* é horizontal, o eixo *y* é para cima e *v* esá em

•

metros por segundo). A bola já passou pelo ponto mais alto da rajetória?

Figura 4-1 1 A bola sempre acerta

4-6 Análise do Movimento Balístico

na lata que está caindo, já que as duas

percorrem a mesma distância *h* em

Agora estamos preparados para analisar o movimento horizontal e vertical de um queda livre.

projéil.

Movimento Horizontal

Como *não existe aceleração* na direção horizontal, a componente horizontal *vx* da velocidade de um projéil permanece inalterada e igual ao valor inicial *Vox* durante

toda a rajetória, como mostra a Fig. 4-12. Em qualquer instante *t,* o deslocamento

horizontal do projétil em relação à posição inicial, *x - x0,* é dado pela Eq. 2-15 com *a* = O, que podemos escrever na forma

X - Xo = Vx.

Como *Vox = v0* cos *00,* temos:

x - x0 =* (*v0* cos *0)l.

(4-21)

$$v_y = v_0 \operatorname{sen} \theta_0 - gt$$

Movimento Vetical

O movimento verical é o movimento que discuimos na Seção 2-9 para uma par

ícula em queda livre. O mais importante é que a aceleração é constante. Assim, as

equações da Tabela 2-1 podem ser usadas, desde que *a* seja subsituído por - *g* e o eixo *x* seja substituído pelo eixo *y.* A Eq. 2-15, por exemplo, se torna

y - Yo = voyl - igt2

= (*v0* sen 0)t - [illegible] *2,*

(4-22)

onde a componente vertical da velocidade inicial*, Voy,* foi subsituída pela expressão equivalente v *0* sen 8 *0*• Da mesma forma, as Eqs. 2-11 e 2-16 se tomam

(4-23)

e

[illegible] = (*v0* sen 80)2 - *2g(y - Yo).***

(4-24)

Figua 4-12 A componente vertical da

Como mosram a Fig. 4-9 e a Eq. 4-23, a componente vertical da velocidade se

velocidade deste skatista está variando,

comporta exatamente como a de uma bola lançada verticalmente para cima. Está

mas não a componente horizontal,

dirigida inicialmente para cima e o módulo diminui progressivamente até se anular,

que é i

xatamente no ponto mais alto a trajetória. **Em seguida, a componente vertical da**

ual à velocidade do skate. Em

consequência, o skate permanece abaixo

velocidade muda de sentido e o módulo passa a aumentar com o tempo.

do atleta, permitindo que ele pouse no

skate após o salto. ***Fonte:*** **Jamie Budge/**

Liaison/Getty Images, Inc.

quaão da Trajetória

Podemos obter a equação do caminho percorrido pelo projéil (a trajetória) eliminando o tempo ***t*** **nas Eqs. 4-21 e 4-22. Explicitando** ***t*** **na Eq. 4-21 e subsituindo o** ***y***

resultado na Eq. 4-22, obtemos, após algumas manipulações algébricas,

gx2

y = (tan 8o)x -

(trajetória).

2(

(4-25)

Vo COS ***)*** **)7**

o -

Esta é a equação da trajetória mostrada na Fig. 4-9. Ao deduzi-la, para simplificar,

izemos o = O e y

Figua 4-13 (1) Trajetória de uma

0 = O nas Eqs. 4-21 e 4-22, respectivamente. Como *g,* 80 e v *0* são

constantes, a Eq. 4-25 é da forma *y* = *x* + *bx2*

bola, levando em cona a resistência

, onde *a* e *b* são constantes. Como

do ar. (I) Trajetória que a bola

essa é a equação de uma parábola, dizemos que a trajetória é *parabólica.*

seuiria no vácuo, calculada usando

as equações deste capítulo. Os dados

Alcance Horizontal

correspondentes estão na Tabela 4-1.

(Adapada de "Toe Trajectory of a Fly

O *alcance horizontal R* de um projéil é a disância *horizontal* percorida pelo pro

Bali", Peter J. Brancazio, *The Physics*

jéil até voltar à altura inicial (altura de lançamento). Para determinar o alcance *R,*

***Teacher,* January 1985.)**

fazemos *x* - o = *R* na Eq. 4-21 e *y -y0* = O na Eq. 4-22, obtendo *R* = (v *0* cos 8o)t

Tabela 4-1

76,8m

Vj

Tempo de

R* = -sen *280.

percurso

6,6 s

7,9 s

g

(4-26)

•Veja a Fig. 4-13. O ângulo de lançamento é

***Atenção:* esta equação *não fonece* a distância horizontal percorrida pelo projétil 6'' e a velocidade de lançamento é 44,7 m/s.**

quando a altura final é diferente da altura de lançamento.

Observe que *R* na Eq. 4-26 ainge o valor máximo para sen 280 = 1, que corresponde a 280 = 90° ou 8 *0* = 45°.

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

71

O alcance horizontal *R* é mximo para um ângulo de lançamento de 45º.

Quando a altura fmal é diferente da altura de lançamento, com acontece no arremesso de peso, no lançamento de disco e no basquetebol, a distância horizontal máxima não é atingida para um ângulo de lançamento de 45°.

Efeito do r

Até agora, supusemos que o ar não exerce efeito algum sobre o movimento de um

projéil. Em muitas siuações, porém, a diferença enre a rajetória calculada desta

forma e a rajetória real do projétil pode ser considerável, já que o ar resiste (se opõe)

ao movimento. A Fig. 4-13, por exemplo, mosra as rajetórias de duas bolas de beisebol que deixam o bastão fazendo um ângulo de 60° com a horizontal, com uma velocidade inicial de 44,7 m/s. A trajetória I (de uma bola de verdade) foi calculada

para as condições normais de jogo, levando em conta a resistência do ar. A trajetória

II (de uma bola em condições ideais) é a rajetória que a bola seguiria no vácuo.

TESTE 4

Uma bola de beisebol é rebatida na dição do campo de jogo. Durante o percurso (ignorando o efeito do ar), o que acontece com a componente (a) horizontal e (b) vertical da velocidade? Qual é a componente (c) horizontal e (d) vertical da aceleração durante a

subida, durante a descida e no ponto mais alto da trajetória?

Exemplo

Projétil lançado de um avião

Na Fig. 4-14, um avião de salvamento voa a 198 *h paradamente (não é preciso levar em conta a curvatura da (= 55,0 m*s), a uma alura constante de 500 m, rumo a um rajetória).

ponto diretamente acima da víima de um naurágio, para

deixar cair uma balsa

Cálculos Na Fig. 4-14, vemos que > é dado por

(a) Qual deve ser o ângulo > da linha de visada do piloto para

' X

a víima no insante em que o piloto deixa cair a balsa?

.

'*Y* = tau- -

h '

(4-27)

onde *x* é a coordenada horizontal da víima (e da balsa ao

I D EIAS-CHAVE

chegar à água) e *h* = 500 m. Podemos calcular *x* com o

Depois de liberada, a balsa é um projéil; assim, os mo auxílio da Eq. 4-21:

vimentos horizontal e verical podem ser examinados seX - Xo = (Vo cos Bo)l.

(4-28)

y

Sabemos que x0 = O porque a origem foi colocada no

ponto de lançamento. Como a balsa é *dexda cair* e não

arremessada do avião, a velocidade inicial v *0* é igual à velocidade do avião. Assim, sabemos também que a veloci

h

dade inicial tem módulo v0 = 55,0 m/s e ângulo *00* = Oº

(medido em relação ao semieixo *x* posiivo). Enretanto,

não conhecemos o tempo *t* que a balsa leva para prcorrer

a distância do avião até a víima.

Para determinar o valor de t, temos que considerar o

movimento *vertical* e, mais especificamente, a Eq. 4-22:

Figura 4-14 Um avião lança uma balsa enquanto se desloca

***y* - *Yo* = (*v0* sen *Oo)t* - *!gt2*.**

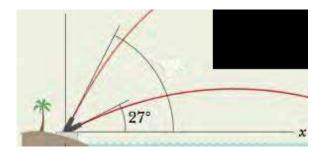
(4-29)

com velocidade consante em um voo horizontal. Durante a

queda, a velocidade horizontal da balsa permanece igual à

onde o deslocamento vertical *y* - y0 da balsa é -500 m

velocidade do avião.

(o valor negaivo indica que a balsa se move *para baixo)*.

Assim,

em relação ao valor inicial *Vx* = v0 cos 9 *0,* pois não exis

-500 n,

te uma aceleração horizontal. (3) A componente v

= (55,0 m/s)(scn Oº)t - J (9,8 m/s2)t2

Y muda

. (4-30) em relação ao valor inicial v), = v0 sen 9 *0,* pois existe uma

Resolvendo esa equação, obtemos *t* = 10,1. Subsituindo aceleração verical.

este valor na Eq. 4-28, obtemos:

***Cálculos* Quando a balsa atinge a água,**

***x* - O = (55,0 m/s)(cos 0°)(10,1 s), (4-31)**

v

ou

x = v *0* cos 0 = (55,0 m/s)(cos Oº) = 55,0 m/s.

***X* = 555,5 n.**

Usando a Eq. 4-23 e o tempo de queda da balsa *t* = 10,1 s,

Nesse caso, a Bq. 4-27 nos dá

descobrimos que, quando a balsa atinge a água,

vy = v *0* sen 1 - gt

(4-32)

,1, _

_1 555.5 n1

, - tan _00

, m = 48,0º .

(Resposta)

= (55,0 n1/s)(sen Oº) - (9,8 m/s2)(10,1 s)

(b) No momento em que a balsa ainge a água, qual é a sua

= -99,0 *mls.*

velocidade *v* em termos dos vetores unitários e na notação Assirn, temos:

módulo-ângulo?

A

-

A

v = (55,0 m/s)i - (99,0 m/s)j.

(Resposta)

I D EIAS-CHAVE

Usando a Eq. 3-6 como guia, descobrimos que o módulo

(1) As componentes horizontal e vertical da velocidade da e o ângulo de *v* são

balsa são independentes. (2) A componente vx não muda

***v* = 113 m/s e *)* = -60,9º.**

(Resposta)

Exemplo

Tiro de canhão contra um navio pirata

A Fig. 4-15 mostra um navio pirata a 560 m de um forte *Cálculos* Podemos relacionar o ângulo de lançamento 9 *0*

que protege a enrada de um porto. Um canhão de defesa, ao alcance *R* aravés da Eq. 4-26, que pode ser escrita na situado ao nível do mar, dispara balas com uma velocidade forma

inicial v0 = 82 m/s.

***:* _**

(a) Com que ângulo 9

1 *gR*

(b) Qual é o alcance máximo das balas de canhão?

y

Dois ângulos de

lançamento são

***Cálculos* Como vimos anteriormente, o alcance máximo**

' .

poss1ve1s.

corresponde a um ângulo de elevação 9 *0* de 45°. Assim,

12

(82 m/s)2

***R* = _ scn 200 = *9* 8· *1* 2 sen (2 X 45°)**

g

, m s

63º

= 686 m = 690 m.

(Resposta)

Quando o navio pirata se afasta do porto, a diferença enre

os dois ângulos de elevação que permitem acertar o navio

diminui até que se tomam iguais enre si e iguais a 9 = 45º

R = 560 m

quando o navio está a 690 m de distância. Para distâncias

Figura 4-15 Um navio pirata sendo atacado.

maiores, é impossível acerar o navio.

$\vec{v}$
$\vec{a}$
$\vec{v}$

4-7 Movimento Circular Uniforme

O vetor aceleração

sempre aponta para

Uma partícula em movimento circular uniforme descreve uma circunferência ou

o centro.

um arco de circunferência com velocidade escalar constante *(unfome)*. Embora a

-

velocidade escalar não varie nesse ipo de movimento*, a partícula está acelerda*

V

porque a direção da velocidade esá mudando.

A Fig. 4-16 mosra a relação enre os vetores velocidade e aceleração em várias

\

\

posições durante o movimento circular uniforme. O módulo dos dois vetores per

\

>1 ---]-:

manece constante durante o movimento, mas a orientação varia continuamente. A

-

I

a

velocidade está sempre na direção tangente à circunferência e tem o mesmo senido

que o movimento. A aceleração está sempre na direção *rdial* e aponta para o centro da circunferência Por essa razão, a aceleração associada ao movimento circular uniforme é chamada de aceleração centrípeta ("que busca o cenro"). Como será

O vetor velocidade

demonstrado a seguir, o módulo dessa aceleração ã é

é sempre tangente

à trajetória.

v2

a* = *r

(aceleração centrípeta),

(4-34)

Figura 4-16 Os vetores velocidade

e aceleração de uma partícula em

onde *r* é o raio da circunferência e *v* é a velocidade da parícula.

movimento circular uniforme.

Durante essa aceleração com velocidade escalar constante, a partícula prcorre

a circunferência completa (uma distância igual a 2rr) em um intervalo de tempo

dado por

T **2Tr**

=

(período).

(4-3

V

5)

O parâmetro *T* é chamado de *período de revolução* ou, simplesmente, *período.* No caso mais geral, o período é o tempo que uma parícula leva para completar uma

volta em uma rajetória fechada.

Demonstaão da Eq. 4-34

Para determinar o módulo e a orientação da aceleração no caso do movimento circular uniforme, considere a Fig. 4-17. Na Fig. 4-17 *a,* a parícula *p* se move com velocidade escalar constante *v* enquanto percorre uma circunferência de raio *r.* No instante mosrado, as coordenadas de *p* são *xP* e Yp·

Como vimos na Seção 4-3, a velocidade *v* de uma partícula em movimento é

sempre tangente à rajetória da partícula na posição considerada. Na Fig. 4-17 *a,* isso significa que i é perpendicular a uma reta *r* que liga o cenro da circunferência à posição da parícula. Nesse caso, o ângulo } que *v* faz com uma reta verical passando pelo ponto *p* é igual ao ângulo } que o raio *r* faz com o eixo *x.*

X

p

(a)

(b)

(e)

Figura 4-17 Uma partícula *p* em movimento circular uniforme no sentido antihorário.

(a) **Posição e velocidade i da partícula em um certo instante de tempo.**
(b) **Velocidade i.**

(e) Aceleração *ã*.

As componentes escalares de i parecem na Fig. 4-17 *b.* Em termos dessas componentes, a velocidade i pode ser escria na forma *v* = vxi + vyJ = (-v sen 8)1 + (v cos 8)).

(4-36)

Usando o triângulo retângulo da Fig. 4-17a, podemos substituir sen } por *y,Jr* e cos

} por *x/r* e escrever

+ v (*vy,*

= -

1 +

)-

),- (VXp J.

r

r

(4-37)

Para determinar a aceleração ã da parícula *p,* dvemos calcular a derivada dessa

equação em relação ao tempo. Observando que a velocidade escalar *v* e o raio *r* não variam com o tempo, obtemos

_ *dv (v [illegible] v *dx1 [illegible]

a =

= --

, + -

J.

dt

r dt

r dt

(4-38)

Note que a taxa de variação com o tempo de *yp, dy,Jdt,* é igual à componente *y* da velocidade, vy-Analogamente, *x,Jdt* = vx, e, novamente de acordo com a Fig. 4-17b,

vx = -v sen } e v *1* = v cos O. Fazendo essas subsituições na Eq. 4-38, obtemos

(v2) (v2)

â = -" cos 8 i + -" sen 8 j.

(4-39)

Este vetor e suas componentes aparecem Fig. 4-17c. De acordo com a Eq. 3-6,

temos:

v2

v2

v2

***a* = [illegible] + [illegible] =**

J

- V(cos 8)2 + (sen 8)2 = - T = -,

r

r

r

como queríamos demonstrar. Para determinar a orientação de *ã*, calculamos o ângulo *p* da Fig. 4-17c: ay

-(v2/r) sen J

tan > = - = (21)) = tan 8.

a.

- v r cos

Assim, *p = }*, o que signiica que ã apona na direção do raio *r* da Fig. 4-17a, no senido do cenro da circunferência, como queríamos demonstrar.

TESTE 5

Um objeto se move com velocidade escalar consante, ao longo de uma trajetória circular, em um plano y hozonal com centro na origem. Quando o objeto esá em x = -2

m, a velocidade é -(4 /s)j. Determine (a) a velocidade e (b) a aceleração do objeto em y = 2 m.

Exemplo

Pilotos de caça fazendo cuvas

Os pilotos de caça se preocupam quando têm que fazer cur mentada, o piloto deixa de enxergar e, logo depois, perde vas muito fechadas. Como o corpo do piloto ica submeido a consciência, uma situação conhecida

como *g-LOC*, da à aceleração cenrípeta, com a cabeça mais próxima do cen expressão em inglês *g-induced loss of consciousness*, ou tro de curvatura, a pressão sanguínea no cérebro diminui, seja, "perda de consciência induzida por *g"*.

o que pode levar à perda das funções cerebrais.

Qual é o módulo da aceleração, em unidades de

Os sinais de perigo são vios. Quando a aceleração *g*, para um piloto cuja aeronave inicia uma curva hori-cenrípeta é *2g* ou *3g*, o piloto se sente pesado. Por volta

-

A

zontal com uma velocidade *v*, = (400 i + 500 j) m/s e,

de 4g, a visão do piloto passa para preto e branco e se re 24,0 s mais tarde, termina a curva com uma velocidade duz à ''visão de túnel". Se a aceleração é manida ou au-

-

A

***v* =**

i

(-400i - 500j) m/s?

-

$x_{PA} = x_{PB} + x_{BA}.$

$v_{PA} = v_{PB} + v_{BA}.$

 P

x_{BA} $x_{PA} = x_{PB} + x_{BA}$

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

75

IDEIAS-CHAVE

Nesta equação, *v* é o módulo (constante) da velocidade

Supomos que o avião execute a curva com um movimento durante a curva. V amos substituir as componentes da vecircular uniforme. Nesse caso, o módulo da aceleração locidade inicial na Eq. 3-6: cenrípeta é dado pela Eq. 4-34 (a = *2/R)*, onde R é o

***v* = Y(400 m/s)2 + (500 m/s)2• = 640,31 1n/s.**

raio da curva. O tempo necessário para descrever uma

circunferência completa é o período dado pela Eq. 4-35 Para determinar o período *T* do movimento, observamos *(T*

que a velocidade final é igual ao negaivo da velocidade

= 2'TR!v).

inicial. Isso signiica que a aeronave termina a curva no

lado oposto da circunferência e completou metade de uma

***Cálculos* Como não conhecemos o raio *R,* vemos explicitar circunferência em 24,0 s. Assim, levaria *T* = 48,0 s para *R* na Eq. 4-35 e**

subsituí-lo pelo seu valor na Eq. 4-34. O desrever uma circunferência completa. Subsituindo esses resultado é o seguinte:

valores na equação de *a*, obtemos

a

2V

2T(640,31 111/s)

=

T '

***a* =**

48,0 s

= 83,81 n1fs1 = *8,6g*.

(Resposta)

4-8 Movimento Relativo em Uma Dimensão

Suponha que você veja um pato voando para o norte a 30 km/h. Para um ouro pato

que esteja voando ao lado do primeiro, o pimeiro parece estar parado. Em outras

palavras, a velocidade de uma parícula depende do referencial de quem está observando ou medindo a velocidade. Para nossos propósitos, um referencial é um objeto no qual fixamos um sistema de coordenadas. No dia a dia, esse objeto é frequentemente o solo. Assim, por exemplo, a velocidade que aparece em uma multa de rânsito é a velocidade do carro em relação ao solo. A velocidade em relação ao

guarda de trânsito será diferente se o guarda estiver se movendo enquanto mede a

velocidade.

Suponha que Alexandre (situado na origem do referencial *A* da Fig. 4-20) esteja

parado no acosamento de uma rodovia, observando o caro *P* (a "partícula") passar.

Bárbara (situada na origem do referencial B) está dirigindo um carro na rodovia com

velocidade constante e também observa o carro *P*. Suponha que os dois meçam a

posição do carro em um dado momento. De acordo com a Fig. 4-18, temos:

(4-40)

Essa equação significa o seguinte: "A coordenada *Xp,1* de *P* medida por *A* é *igual* à coordenada *Xp8* de *P* medida por *B* mais a coordenada x *A* de *B* medida por *A"*. Observe que esta leitura está de acordo com a ordem em que os índices foram usados.

O referencial B se move em

Derivando a Eq. 4-40 em relação ao tempo, obtemos

relação ao referencial *A*

enquanto ambos observam *P*.

d

d

_8A_ é a velocidade do referencial B em relação ao referencial _A_.

Neste capítulo, estamos considerando apenas referenciais que se movem com o carro _P_ enquanto _B_ e _P_ se movem velocidade constante um em relação ao ouro. Em nosso exemplo, isso significa que com velocidades diferentes ao longo do Bárbara (referencial B) dirige com velocidade consante _v_

eixo _x_ comum aos dois referenciais. No

_a"_ em relação a Alexandre instante mosrado, x

(referencial A). Esta resrição não vale para o caro _P_ (a parícula em movimento),

_8A_ é a coordenada de

_B_ no referencial _A_. A coordenada de _P_ é

cuja velocidade pode mudar de módulo e direção (ou seja, a partícula pode sofrer _Xp8_ no referencial _B_ e _Xp1 = Xp8 - x8A_ no uma aceleração).

referencial _A_.

$a_{PA} = a_{PB}.$

Para relacionar as acelerações de *P* medidas por Bárbara e por Alexandre em um

mesmo instante, calculamos a derivada da Eq. 4-41 em relação ao tempo:

d

d

d

dt* (*V 1'1) = dt* (*V l'JJ) + dt* (*V 111).

Como *v A* é constante, o úlimo trmo é zero e temos

(4-42)

Em outras palavras,

A aceleração de uma partícula medida por observadores em referenciais que se movem

com velocidade consante um em relação ao outro é exatamene a mesma.

Exemplo

Movimento relativo unidimensional: Alexandre e Bárbara

Na Fig. 4-18, suponha que a velocidade de Bárbara em re a Eq. 2-11 (v = v0 + *at)* para relacionar a aceleração às lação a Alexandre seja *v8A* = 52

Comentrio **Este resulado é previsível. Como Alexandre**

Para calcular a aceleração do carro *P em relação a Ale* e Bárbara estão se movendo com velocidade constante um *xandre,* devemos usar a velocidade do carro *em relação a* em relação ao ouro, a aceleração do carro *P* medida pelos *Alexandre.* Como a aceleração é constante, podemos usar dois deve ser a mesma.

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

77

4-9 Movimento Relativo em Duas Dimensões

y

Nossos dois amigos estão novamente observando o movimento de uma partícula *P*

a partir da origem dos referenciais *A* e *B*, enquanto *B* se move com velocidade constante v *A* em relação a A. (Os eixos correspondentes aos dois sistemas de coordenadas permanecem paralelos.) A Fig. 4-19 mostra um certo instante durante o movimento.

Nesse instante, o vetor posição da origem de B em relação à origem de *A* é *A.* Os vetores posição da partícula *P* são rp *1* em relação à origem de *A* e 'p *8* em relação à origem de *B.* A posição das origens e exremidades desses três vetores mostra que

estão relacionados aravés da equação

Referencil *A*

. -

-

r

Figura 4-19 O referencial *B* possui

1•1* = l' *pu* + *r n11·

(4-43) uma velocidade bidimensional consante

Derivando essa equação em relação ao tempo, enconramos uma equação que envolve iA em relação ao referencial *A.* O vetor as velocidades

posição de *B* em relação a *A* é r

A.

***vPA* e *vp8* da partícula *P* em relação aos nossos observadores:**

. . -

Os vetores posição da partícula *P* são *rPA*

em relação a *A* e rp *8* em relação a *B.*

V /'li = *V l'/1 + V /)11•*

(4-44)

Derivando esta equação em relação ao tempo, obtemos uma equação que envolve

as acelerações âp *1* e âp *8* da parícula *P* em relação aos nossos observadores. Note, porém, que, como *v BA* é constante, sua derivada em relação ao tempo é nula. Assim,

obtemos

•

•

a 1'11 = a r1t·

(4-45)

Assim, da mesma forma que no movimento unidimensional, temos a seguinte

regra: a aceleração de uma parícula medida por observadores em referenciais

que se movem com velocidade constante um em relação ao outro é exatamente

a mesma.

Exemplo

Movimento relativo bidimensional: aviões

Na Fig. *4-20a*, um avião se move para leste enquanto o

N

piloto direciona o avião ligeiramente para o sul do leste,

Esta é a rota do avião.

de modo a compensar um vento constante que sopra para

-

nordeste. O avião tem uma velocidade V

v.4S

Av em relação ao

vento, com uma velocidade do ar (velocidade escalar em

N

relação ao vento) de 215 km/h e uma orientação que faz Esta

J

é a orientação

20º

um ângulo } ao sul do leste. O vento tem uma velocidade do avião.

Vs

Vvs em relação ao solo, com uma velocidade escalar de 65,0

Esta é a direção

km/h e uma orienação que faz um ângulo de 20º a leste

do vento.

do norte. Qual é o módulo da velocidade *v S* do avião em

relação ao solo e qual é o valor de O?

(a)

IDEIAS-CHAVE

A situação é semelhante à da Fig. 4-19. Nesse caso, a par

I

-

tícula *P* é o avião, o referencial *A* está associado ao solo

I.

(que chamaremos de S) e o referencial *B* está associado ao

vento (que chamaremos de *)*. Precisamos construir um

A rota do avião é a soma

diarama vetorial semelhante ao da Fig. 4-19, mas, dessa

vetorial dos outros dois

vez, usando os rês vetores velocidade.

vetores

(b)

***Cálculos* Primeiro, escrevemos uma frase que expressa**

uma relação enre os três vetores da Fig. 4-20b:

Figura 4-20 Efeito do vento sobre um avião.

onde *xi, yj* e k são as componentes vetoriais do vetor posição *r* que é chamado de *aceleração instantânea* ou, simplesmente, *aceex, y* e *z* são as componentes escalares (e ambém as coordenadas *leração:* da partícula). Um vetor posição pode ser descrito por um módulo

dv

e um ou dois ângulos, pelas componentes vetoriais ou pelas coma =

(4-16)

ponentes escalares.

***dr* ·**

Na notação de vetores unitários,

Deslocamento Se uma partícula se move de tal forma que o

.

.

.

.

vetor posição muda de ; para '

***a* = a.,.i + *axj* + a,k,**

(4-17)

2, o *deslocamento .r* da partícula

é dado por

onde *ax = dvxldt, a = dv ldt* e *a, = dv/dt.*

Y

onde

se *x*

v

0* e y0 das Eqs. 4-21, 4-22, 4-23 e 4-24 forem nulos. O alcance *x* = *dxldt, v* = *dyldt* e *v,* = *d/dt.* A velocidade instantânea *Y

***i* de uma partícula é sempre tangente à trajetória da partícula na horizontal *R* da partícula, que é a distância horizontal do ponto de posição da partícula.**

lançamento ao ponto em que a partícula retorna à altura do ponto

de lançamento, é dado por

Aceleração Média e Aceleração Instantânea Se a velociv3

***R* =**

dade de uma partícula varia de i

'

- sen 280.

(4-26)

1 para v2 no intervalo de tempo *.t,*

PARTE 1

Movimento Circular Uniforme Se uma partícula descreve O parâmetro *T* é chamado de *período de revolção* ou, simplesuma circunferência ou arco de circunferência de raio *r* com veloci mente, *período.*

dade consante *v,* dizemos que se rata de um *movimento circular*

***uniforme.* Nesse caso, a partícula possui uma aceleração *ã* cujo Movimento Relativo Quando dois referenciais *A* e *B* estão módulo é dado por**

se movendo um em relação ao outro com velocidade consante, a

v2

velocidade de uma partícula *P,* medida por um observador do ren = -.

r

(4-34) ferencial *A,* é em geral diferente da velocidade medida por um observador do referencial *B.* As duas velocidades estão relacionadas O vetor ã aponta para o centro da circunferência ou arco de cir aravés da equação

cunferência e é chamado de *aceleração centrpeta.* O tempo que

-

- ..

a partícula leva para descrever uma circunferência completa é

I' *'i* - *V* 'li + V 111,

(4-44)

dado por

onde iM é a velocidade de B em relação a *A*. Os dois observadores

medem a mesma aceleração:

2rr

***T* - --**

(4.35)

- -

***a* l'I = *a* 1•11.**

(4-45)

1

P E R G U N T A S

1

1 A Fig. 4-21 mosra o caminho seuido por um gambá à procu 4 Você tem que lançar um foguete, praticamente do nível do solo, ra de comida no lixo, a partir do ponto inicial *i.* O gambá levou com uma das velocidades iniciais especiicadas pelos seguintes vetoo mesmo tempo *T* para ir de cada um dos pontos marcados até o res: (1) v0 = 20i + 70}; (2) v0 = -20i +70}; (3) i A

A

0 = 20i-70]; (4)

ponto seuinte. Ordene os pontos *a, b* e *c* de acordo com o módulo i0 = -20 i -70 j. No seu sistema de coordenadas, *x* varia ao longo do da velocidade média do gambá para alcançá-los a partir do ponto nível do solo e *y* cresce para cima. (a) Ordene os vetores de acordo inicial *i,* começando pelo maior.

com o módulo da velocidade de lançamento do projétil, começando

pelo maior. (b) Ordene os vetores de acordo com o tempo de voo

do projétil, começando pelo maior.

5 A Fig. 4-23 mosra rês situações nas quais projéteis iuais são

lançados do solo (a partir do mesmo nível) com a mesma velocidaa

t

b

e

de escalar e o mesmo ângulo. Enretanto, os projéteis não caem no

--I

mesmo terreno. Ordene as situações de acordo com a velocidade

escalar fnal dos projéteis imediatamente antes de aterrissarem, co

Figura 4-21 Pergunta 1.

meçando pela maior.

2 A Fig. 4-22 mostra a posição inicial *i* e a posição fnal *f* de uma
partícula. Determine (a) o vetor posição inicial ; e (b) o vetor po

l i

sição tinal j da partícula, ambos na notação de vetores unitários.

(c) Qual é a componente *x* do deslocamento lr?

(a)

(b)

(e)

Figura 4-23 Pergunta 5.

3 rn

2 m,r ----- •t

6 O único uso decente de um bolo de frutas é na prática da caa

/

**l m [illegible]

pulta. A curva 1 na Fig. 4-24 mosa a altura *y* de um bolo de fruas

arremessado por uma caapulta em função do ângulo J entre o vetor

velocidade e o vetor aceleração durante o percurso. (a) Qual dos

pontos assinalados por leras nessa curva corresponde ao chque do

bolo de frutas com o solo? (b) A curva 2 é um gráico semelhante

para a mesma velocidade escalar inicial, mas um ânulo de lançamento diferente. Nesse caso, o bolo de frutas vai cair em um ponto mais distante ou mais próximo do ponto de lançamento?

z

Figura 4-22 Pergunta 2.

y

-

3

Quando Paris foi bombardeada a mais de 100 m de dis-

tância na Primeira Guerra Mundial, por um canhão apelidado de

"Big Bertha", os projéteis foram lançados com um ânulo maior

que 45" para atingir uma distância maior, possivelmente até duas

vezes maior que a 45º. Este resulado significa que a densidade do

A

B

ar em grandes altitudes aumenta ou diminui?

Figura 4-24 Pergunta 6.

4
5
6

2
1

1
2
3

a

7 Um avião que esá voando horizontalmente com uma velocida tiicados por leras no gráico de acordo (a) com o tempo que a bola de constante de 350 km/h, sobrevoando um terreno plano, deixa permanece no ar e (b) com a velocidade da bola na altura máxima, cair um fardo com suprimentos. Inore o efeito do ar sobre o fardo. em ordem decrescente.

Quais são as componentes iniciais (a) vertical e (b) horizontal da

velocidade inicial do fardo? (c) Qual é a componente horizonal da

R

velocidade imediatamente antes de o fardo se chocar com o solo?

b

(d) Se a velocidade do avião fosse 450 km/h, o tempo de queda seria maior, menor ou igual?

8 Na Fig. 4-25, uma tangerina é arremessada para cima e passa pelas janelas 1, 2 e 3, que têm o mesmo tamanho e estão regularmente Figura 4-27 Pergunta 10.

**L-- - - - - - [illegible]

espaçadas na vertical. Ordene essas três janelas de acordo (a) com

o tempo que a tangerina leva para passar e (b) com a velocidade 1 1 A Fig. 4-28 mosra quaro rilhos (semicírculos ou quartos de média da tangerina durante a passagem, em ordem decrescente.

círculo) que podem ser usados por um rem, que se move com velo

Na descida, a tangerina passa pelas janelas 4, 5 e 6, que têm o cidade escalar constante. Ordene os rilhos de acordo com o módulo mesmo ho e não estão regularmente espaçadas na horizontal. de aceleração do rem no recho curvo, em ordem decrescente.

Ordene essas três janelas de acordo (c) com o tempo que a angerina

leva para passar e (d) com a velocidade média da tangerina durante

------- 1

a passagem, em ordem decrescente.

-*43

4

t

Figura 4-28 Pergunta 11.

12 Na Fig. 4-29, a partícula *P* está em movimento circular uniforme em tono da origem de um sistema de coordenadas *y.* (a) Para que valores de) a componente vertical rY do vetor posição possui

Figura 4-25 Pergunta 8.

maior módulo? (b) Para que valores de) a componente vertical vY

da velocidade da partícula possui maior módulo? (c) Para que valo9 A Fig. 4-26 mostra três trajetórias de uma bola de futebol chu res de) a componente vertical *a*

tada a partir do chão. Ignorando os efeitos do ar, ordene as rajetó

′ da aceleração da partícula possui

maior módulo?

rias de acordo (a) com o tempo de percurso, (b) com a componente

vertical da velocidade inicial, (c) com a componente horizontal da

y

velocidade inicial e (d) com a velocidade escalar inicial, em ordem

decrescente.

Figura 4-26 Pergunta 9.

Figura 4-29 Pergunta 12.

1 O Uma bola é chutada a partir do chão, em um terreno plano, com

,

13 (a) E possível estar acelerando enquanto se viaja com velocidade

uma certa velocidade inicial. A Fig. 4-27 mostra o alcance *R* da bola escalar constante? E possível fazer uma curva (b) com aceleração em unção do ângulo de lançamento 8 *0*• Ordene os três pontos iden-nula e (c) com uma aceleração de módulo constante?

P R O B L E M A S

1

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do probl ema

-

Informaões adici onais disponíveis em O *Circo Voador* da *F(sica* de Jeal Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 4-2 Posição e Deslocamento

•2 Uma semente de melancia possui as seguintes coordenadas:

A

A

•1 O vetor posição de um elétron é

x = -5,0 m, *y* = 8,0 m e z = O m. Determine o vetor posição da

A

***r* = (5,0 m)i-(3,0 m)j +**

(2,0 m)k. (a) Determine o módulo de r. (b) Desenhe o vetor em um semente (a) na notação de vetores uniários e como b) um módulo sistema de coordenadas dexrogiro.

e (c) um ângulo em relação ao senido posiivo do eixo *x*. (d) Dese-

termina com o vetor posição *r* = 3,0j-4,0k, em metros. Qual era indicando as unidades correspondentes.

o vetor posição inicial do pósiron?

••4 O ponteiro dos minutos de um relógio de parede mede 10 cm

da pona até o eixo de rotação. O módulo e o ângulo do vetor des20°

locamento da ponta devem ser determinados para rês intervalos de

tempo. Determine (a) o módulo e (b) o ângulo associado ao deslocamento da pona enre as posições correspondentes a quinze e rinta minutos depois da hora, (c) o módulo e (d) o ângulo correspondente

à meia hora seguinte, e (e) o módulo e () o ângulo correspondentes

à hora seguinte.

- 20°•-+·-+ 1 '

***t* (s)**

Seção 4-3 Velocidade Média e Velocidade Instantânea

Figura 4.31 Problema 10.

•5 Um trem com uma velocidade constante de 60,0 h se move

na direção leste por 40,0 min, depois em uma direção que faz um Seção 4-4 Aceleração Média e Aceleração ângulo de 50,0º a leste com a dirção norte por 20,0 min e, nal Instantânea

mente, na dirção oese por mais 50,0 min. Quais são (a) o módulo • 11 A posição *r* de uma partícula que se move em um plano *y* é e (b) o ângulo da velocidade média do rem durante a viagem?

A

A

dada por *r* = (2,00t3 -5,00t)i + (6,00 -7,00t4)j, com *r* em m e -

A

A

A

•6 A posição de um elétron é dada por *r* = 3,00ti *-4,0t2* j + 2,00; tros e *tem* segundos. Na notação de vetores unitários, calcule (a) ,, com *t em* segundos e r em meros. (a) Qual é a velocidade i(t) do (b) *v* e (c) *ã* para *t* = 2,00 s. (d) Qual é o ângulo enre o semieielétron na notação de vetores unitários? Quanto vale *v(t)* no instante xo positivo x e uma reta tangente à rajetória da partícula em *t* =

***t* = 2,00 s (b) na notação de vetores unitários e como (c) um módulo 2,00 s?**

e (d) um ângulo em relação ao sentido posiivo do eixo *x?*

• 12 Em um certo insante, um ciclisa está 40,0 m a lese do mas

A

A

A

•7 O vetor posição de umíon é inicialmente *r* = 5,0i -6,0 j +2,0k tro de um parque, indo para o sul com uma velocidade de 10,0 m/s.

A

A

A

e 10 s depois passa a ser *r* = -2, Oi +8, O j-2, O, com todos os valo-Após 30,0 s, o ciclista esá 40,0 m ao norte do masro, dirigindo-se res em

metros. Na notação de vetores unitários, qual é a velocidade para leste com uma velocidade de 10,0 m/s. Para o ciclista, neste média i

intervalo de 30,0 s, quais são (a) o módulo e (b) a direção do des

éd durante os 1

O s?

••8 Um avião voa 483 km para leste, da cidade *A* para a cidade locamento, (c) o módulo e (d) a direção da velocidade média e (e)

***B,* em 45,0 min, e depois 966 km para o sul, da cidade *B* para uma o módulo e () a dição da aceleração média?**

cidade *C,* em 1,50 h. Para a viagem inteira, determine (a) o módulo •13 Uma partícula se move de tal forma que a posição (em meros) e (b) a dir

A

A

A

ção do deslocamento do avião, (c) o módulo e (d) a diem função do tempo (em segundos) é dada por *r* = i + *4t* 2 j + *tk* Es-reção da velocidade média e (e) a velocidade escalar média.

creva expressões para (a) a velocidade e b) a aceleração em função

••9 A Fig. 4-30 mostra os movimentos de um esquilo em um do tempo.

terreno plano, do ponto *A* (no instante *t* = O) para os pontos *B*

A

A

A

• 14 A velocidade inicial de um próton é

A

***v* = 4, Oi -2, O j + 3, Ok;**

(em

A

A

***t* = 5,00 min), *C* (em *t* = 10,0 min) e, inalmente, *D* (em *t* = 4,0 s mais tarde, passa a ser i = -2,0i-2,0j+ 5,0k (em metros 15,0 min). Considere as velocidades médias do esquilo do ponto por segundo). Para esses 4,0 s, deermine quais são (a) a aceleração**

***A* para cada um dos outros rês pontos. Entre essas velocidades média do próton ãéd na notação de vetores unitários, (b) o módulo médias determine (a) o módulo e (b) o ângulo da que possui o me de ãmd e (c) o ângulo enre ãméd e o semieixo *x* positivo.**

nor módulo e (c) o módulo e (d) o ângulo da que possui o maior ••15 Uma partícula deixa a origem com uma velocidade inimódulo.

A

A

cial v = (3,00i) m/s e uma aceleração constante *ã* = (-1,00i -

A

O, 500 j)

***y* (m)**

m/s2• Quando a partícula atinge o máximo valor da coor-

50

aceleração ax = 4,0 m/s2 eaY = -2,0 m/s2• A velocidade inicial tem

componentes = 8,0 m/s e v

- 5 0

Vx

***Y* = 12 m/s. Na notação de vetores**

unitários, qual é a velocidade do carro quando ainge a maior co

Figura 4-30 Problema 9.

ordenada y?

• • 18 Um vento moderado acelera um seixo sobre um plano horizon-de subida e de descida tivessem a mesma altura. Determine a velo

A

A

***lycom* uma aceleração constante *à* = (5,00 m/s2)i +(7,00 m/s2)j. cidade inicial, desprezando a resistência do ar.**

A

No instante *t* = O, a velocidade é (4,00 m/s)i. Quais são (a) o mó- •26 Uma pedra é lançada por uma caapulta no instante *t* = O, com dulo e (b) o ângulo da velocidade do seixo após ter se deslocado uma velocidade inicial de módulo 20,0 m/s e ân 12,0 m paralelamente ao eixo *x*?

ulo 40,0º acima da

horizontal. Quais são os módulos das componentes (a) horizonal

• •• 19 A aceleração de uma parícula que se move apenas em um e (b) vertical do de.locamento da pedra em relação à catapula em A

A

plano horizontal *y* é dada por *ã* = *3ti* + 4j, onde à está em metros *t* = 1,10 s? Repita os cálculos para as componentes (c) horizontal por segundo ao quadrado e t em segundos. Em *t* = O, o vetor posi-e (d) vertical em *t* = 1,80 s e para as componentes (e) horizontal e A

A

ção *r* = (20, O m)i + (40, O m)j indica a localização da partícula, que (f) vertical em *t* = 5,00 s.

A

A

nesse insante tem uma velocidade v = (5,00 m/s)i +(2,00 m/s)j. • •27 Um avião está mergulhando com um ângulo *8* = 30,0º abai

Em *t* = 4,00 s, determine (a) o vetor posição em termos dos vetores xo da horizontal, a uma velocidade de 290,0 h, quando o piloto unitários e (b) o ângulo entre a direção do movimento e o semieixo libera um chamariz (Fig. 4-33). A distância horizonal entre o ponx positivo.

to de lançamento e o ponto onde o chamariz se choca com o solo é

•••20 Na Fig. 4-32, a partícula *A* se move ao longo da reta *y* = *d* = 700 m. (a) Quanto tempo o chamariz passou no ar? (b) De que 30 m com uma velocidade consante i de módulo 3,0 m/s e parale altura foi lançado?

la ao eixo *x.* No instante em que a partícula *A* passa pelo eixo *y,* a partícula *B* deixa a origem com velocidade inicial zero e aceleração

constante *ã* de módulo 0,40 m/s2• Para que valor do ânulo *8* entre

***ã* e o semieixo *y* positivo acontece uma colisão?**

y

Figura 4-33 Problema 27.

B

••28 Na Fig. 4 -34, uma pedra é lançada no alto de rochedo de

altura *h* com uma velocidade inicial de 42,0 m/s e um ângulo 80 =

Figua 4-32 Problema 20.

60,0º com a horizonal. A pedra cai em um ponto *A, 5,50* s após o

lançamento. Determine (a) a altura *h* do rochedo, (b) a velocidade

São 4-6 Análise do Movimento de um Projétil

da pedra imediatamente antes do impacto em *A* e (c) a máxima a l

•21 Um dardo é aremessado hoizontalmente com uma velocidade tura *H* alcançada acima do solo.

inicial de 10 m/s em direção a um ponto *P,* o centro de um alvo de

parede. O dardo ainge um ponto *Q* do alvo, verticalmente abaixo

de *P,* 0,19 s depois do aremesso. (a) Qual é a distância *PQ?* (b) A que disância do alvo foi arremessado o dardo?

H

•22 Uma pequena bola rola horizontalmente até a borda de uma

mesa de 1,20 m de altura e cai no chão. A bola chega ao chão a uma

disância horizontal de 1 ,52 m da borda da mesa. (a) Por quanto

tempo a bola fica no ar? (b) Qual é a velocidade da bola no instante

em que chega à borda da mesa?

Figura 4-34 Problema 28.

•23 Um projétil é disparado horizontalmente de uma arma que • •29 A velocidade de lançamento de um projétil é cinco vezes está 45,0 m acima de um tereno plano, saindo da arma com uma maior que a velocidade na altura máxima. Determine o ângulo de velocidade de 250 *ls.* (a) Por quanto tempo o projétil permanece lançamento 80•

no ar? (b) A que disância horizontal do ponto de disparo o projétil • •30 Uma bola de futebol é chutada a partir do chão com uma se choca com o solo? (c) Qual é o módulo da componente vertical velocidade inicial de 19,5 m/s e um ângulo para cima de 45º. No da velocidade quando o projétil se choca com o solo?

mesmo instante, um jogador a *55* m de distância na direção do chu

•24

No Campeonato Mundial de Atletismo de 1991, em Tó te, começa a correr para receber a bola. Qual deve ser a velocidade quio, Mke Powell

saltou 8,95 m, batendo por *5* cm um recorde de 23 média do jogador para que alcance a bola imediatamente antes de anos estabelecido por Bob Beamon para o salto em distância. Suponha tocar o ramado?

que Powell iniciou o salto com uma velcidade de 9,5 m/s (aproxi • • 31

- Ao dar uma cortada, um jogador de voleibol golpeia

madamente iual à de um velocista) e que *g* = 9,80 m/s2 em Tóquio. a bola com força, de cima para baixo, em direção à quadra adversá-

Calcule a diferença enre o alcance de Powell e o máximo alcance

,

ria. E difícil controlar o ângulo da cortada. Suponha que uma bola

possível para uma partícula lançada com a mesma velocidade.

seja cortada de uma altura de 2,30 m, com uma velocidade inicial

•25

O recorde atual de salto de motocicleta é 77,0 m, es de 20,0 m/s e um ângulo para baixo de 18,00°. Se o ângulo para tabelecido por Jason Renie. Suponha que Renie tenha partido da baixo diminuir para 8,00", a que distância adicional a bola atingirá rampa fazendo um ângulo de 12" com a horizontal e que as rampas a quadra adversária?

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

3

• •32 Você lança uma bola em direção a uma parede com uma ve deinida por v. = 19 *s e vb = 31* s. (a) Que disância horizonal locidade de 25,0 /s e um ângulo) *0* = 40,0º acima da horizontal a bola de golfe percorre antes de tocar novamente o solo? b) Qual (Fig. 4-35). A parede está a uma distância *d* = 22,0 m do ponto de é a altura máxima atingida pela bola?

lançamento da bola. (a) A que distância acima do ponto de lançamento a bola atinge a parede? Quais são as componentes (b) horizontal e (c) verical da velocidade da bola ao aingir a parede? (d) Ao aingir a parede, a bola já passou pelo ponto mais alto da rajetória?

Figura 4-36 Problema 38.

1---- d----

Figura 4-35 Problema 32.

••39 Na Fig. 4 -37, uma bola é lançada para a esquerda da extremidade esquerda do terraço de um ediício. O ponto de lançamento

••33 Um avião, mergulhando com velocidade constante em um está a uma altura *hem* relação ao solo e a bola chega ao solo 1,50 s ân

depois, a uma distância horizonal *d* = 25,0 m do ponto de lançaulo de 53,0º com a vertical, lança um projétil a uma altitude de 730 m. O projétil chega ao solo 5,00 s após o lançamento. (a) Qual mento e fazendo um ânulo) = 60,0º com a horizontal. (a) Deter

é a velocidade do avião? (b) Que distância o projétil percorre ho mine o valor de *h. (Sugestão:* uma forma de resolver o problema é rizontalmente durante o percurso? Quais são as componentes (c) inverter o movimento, como se você estivesse vendo um ilme de horizontal e (d) vertical da velocidade do projétil no momento em trás para a frente.) Quais são (b) o módulo e (c) o ânulo em relação que chega ao solo?

à horizontal com o qual a bola foi lançada?

• •34 - -O rebuchet era uma máquina de aremesso construída

para atacar as muralhas de um castelo durante um cerco. Uma grande

D O O T

pedra podia ser arremessada contra uma muralha para derrubá-la. A

h

máquina não era instalada perto da muralha porque os operadores

6

D D D

--

-

-

-

-'

l

seriam um alvo fácil para as flechas disparadas do alto das muralhas

do castelo . Em vez disso, o trebuchet era posicionado de tal forma
Figura 4-37 Problema 39.

que a pedra aingia a muralha na parte descendente de sua trajetória.
••40 -

Suponha que una pedra fosse lançada com uma velocidade v0 =

Um arremessador de peso de nível olmpico é capaz

28,0 /s e um ângulo) ***0*** **= 40,0°. Qual seria a velocidade da pedra de**
lançar o peso com una velocidade inicial v ***0*** **= 15,00 /s de una se ela**

atingisse a muralha (a) no momento em que chegasse à altura altura de 2,160 m. Que distância horizontal é cobera pelo peso se máxima da rajetória parabólica e (b) depois de cair para metade da o ân

altura máxima? (c) Qual a diferença percentual entre as respostas

ulo de lançamento) ***0*** **é (a) 45,000 e (b) 42,000? As resposas**

mostram que o ângulo de 45°, que maximiza o alcance dos proj é dos iens (b) e (a)?

teis, não maximiza a distância horizontal quando a altura inicial e

••35 Um rile que atira balas a 460 /s é apontado para um alvo a altura inal são diferentes.

situado a 45,7 m de disância. Se o centro do alvo esá na mesma

-

••41

Quando vê um inseto pousado em uma planta perto

altura do rile, para que altura acima do alvo o cano do rile deve da superfície da água, o peixe-arqueiro coloca o focinho para fora ser apontado para que a bala ainja o centro do alvo?

e lança um jato d'água na direção do inseto para derrubá-lo na

••36 Durante una partida de tênis, um jogador saca a 23,6 /s, áua (Fig. 4-38). Embora o peixe veja o inseto na extremidade de com o cenro da bola deixando a raquete horizontalmente a 2,37 m um segmento de reta de comprimento ***d,*** **que faz um ânulo > com de altura em relação à quadra. A rede está a 12 m de distância e tem a supericie da áua, o jato deve ser lançado com um ângulo dife0,90 m de altura. (a) A bola passa para o ouro lado da quadra? (b) rente,** ***60,*** **para que o jato atinja o inseto depois de descrever una Qual é a disância entre o centro da bola e o alto da rede quando a trajetória parabólica. Se > = 36,0°,** ***d*** **= 0,900 n e a**

velocidade de bola chega à rede? Suponha que, nas mesmas condições, a bola dei lançamento é 3,56 /s, qual deve ser o valor de) *0* para que o jato xe a raquete fazendo um ângulo 5,00º abaixo da horizonal. Nesse esteja no ponto mais alto da rajetória quando atinge o inseto?

caso, (c) a bola passa para o ouro lado da quadra? (d) Qual é adistância entre o cenro da bola e o alto da rede quando a bola chega Inseto

à rede?

• •37 Um mergulhador salta com uma velocidade horizontal de 2,00

/s de una plataforma que está 10,0 m acima da superfície da água.

(a) A que distância horizontal da borda da plataforma está o merulhador 0,800 s após o início do salto? (b) A que disância vertical acima da superfície da água está o merulhador nesse instante? (c) Figura 4-38 Problema 41.

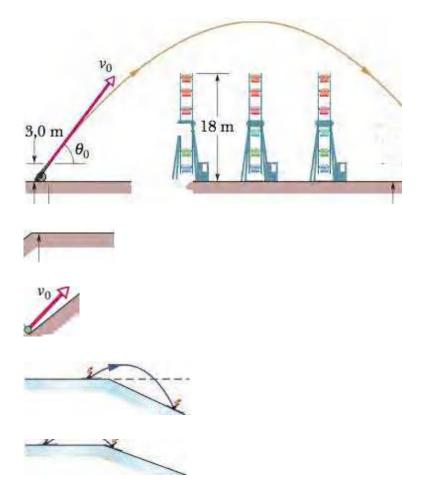
A que distância horizonal da borda da plataforma o mergulhador

atinge a água?

••42

Em 1939 ou 1940, EmanuelZacchini levou seu núme

••38 Uma bola de golfe recebe uma tacada no solo. A velocidade ro de bala humana a novas alturas: disparado por um canhão, pasda bola em função do tempo é mosrada na Fig. 4 -36, onde *t = O* é sou por cima de três rodas-gigante antes de cair em una rede (Fig.

o instante em que a bola foi golpeada. A escala vertical do ráico é 4-39). (a) Tratando Zacchini como una partícula, determine a que

distância vertical passou da primeira roda-gigante. (b) Se Zacchini (a) A bola consegue passar por um alambrado de 7,32 m de alura atingiu a altura xima ao passar pela roda-gigante do meio, a que que esá a uma distância horizontal de 97,5 m do ponto inicial? b) distância vertical passou dessa roda-gigante? (c) A que distância Qual é a distância enre a extreidade superior do alambrado e o do canhão devia estar posicionado o centro da rede (desprezando a cenro da bola quando a bola chega ao alambrado?

resistência do ar)?

••48 Na Fig. 4-41, uma bola é arremessada para o alto de um edifício, caindo 4,00 s depois a uma altura *h* = 20,0 m acima da alura de

lançamento. A trajetória da bola no inal da trajetória tem uma

inclinação 8 = 60,0º em relação à horizontal. (a) Determine a distância horizonal *d* cobera pela bola. (Veja a sugestão do Problema 39.) Quais são (b) o módulo e (c) o ângulo (em relação à horizontal)

-

-

3,0 m Rede

da velocidade inicial da bola?

l

,

, -, .

, .

' , e .

- -2

_

3_

m_

[illegible]

[illegible]

[illegible] *R* [illegible]

[illegible]

para cima. (a) Qual é a altura máxima atingida pela bola? (b) Qual Figura 4-41 Problema 48.

é a distância horizontal coberta pela bola? Quais são (c) o módulo

e (d) o ângulo (abaixo da horizontal) da velocidade da bola no instante em que atinge o solo?

• ••49 O chute de um jogador de futebol americano imprime à

bola uma velocidade inicial de 25 m/s. Quais são (a) o menor e

• •44 Uma bola de beisebol deixa a mão do lançador horizonal mente com uma velocidade de 161 /h. A distância até o rebatedor (b) o maior ângulo de elevação que ele pode impriir à bola para marcar *umied goal a partir de um ponto situado a 50 m da meta,**

é 18,3 m. (a) Quanto tempo a bola leva para percorrer a primeira cujo travessão está 3,44 m acima do gramado?

metade da distância? (b) E a segunda metade? (c) Que distância a

bola cai livremente durante a primeira metade? (d) E durante a se •••50 Dois segundos após ter sido lançado a partir do solo, um gunda metade? (e) Por que as respostas dos itens (c) e (d) não são prjétil deslocou-se 40 m horizontalmente e 53 m verticalmente iguais?

em relação ao ponto de lançamento. Quais são as componentes (a)

horizontal e (b) verical da velocidade inicial do projéil? (c) Qual

••45 Na Fig. 4-40, uma bola é lançada com uma velocidade de 10,0 é o deslocamento horizontal em relação ao ponto de lançamento

/s e um ângulo de 50,0º com a horizonal. O ponto de lançamento no insante em que o projétil atinge a alura máxima em relação ao fica na base de uma rampa de comprimento horizontal d1 = 6,00 m solo?

e altura *d2* = 3,60 m. No alto da rampa existe um esrado horizonal.

(a) A bola cai na rampa ou no platô? No momento em que a bola •• •51

Os esquiadores experientes costumam dar um pecai, quais são (b) o módulo e (c) o ângulo do deslocamento da bola queno salto antes de chegarem a uma encosta descendente. Consiem relação ao ponto de lançamento?

dere um salto no qual a velocidade inicial é v0 = 1 O /s, o ângulo é

8 *0* = 9,0°, a pista antes do salto é apoximadamente plana e a encosta

-

tem uma inclinação de 11,3°. A Fig. 4-42a mosra um *pré-salto* no

qual o esquiador desce no início da encosta. A Fig. 4-42b mosra um

.2

salto que começa no momento em que o esquiador está chegando

Bola

à encosta. Na Fig. 4 -42a, o esquiador desce apoxmadamente na

- d1 J

mesma alura em que começou o salto. (a) Qual é o ângulo> enre

a rajetória do esquiador e a encosta na situação da Fig. *4-42a?* Na

Figura 4-40 Problema 45.

siuação da Fig. 4-42b, (b) o esquiador desce quantos metros abaixo da altura em que começou o salto e (c) qual é o valor de >? (A

• •46

-Alguns jogadores de basquetebol parecem lutuar no queda maior e o maior valor de > podem fazer o esquiador perder ar durante um salto

em direção à cesta. A ilusão depende em boa o equilíbrio.)

parte da capacidade de um jogador experiente de trocar rapidamente a bola de mão durante o salto, mas pode ser acentuada pelo fato de que o jogador percorre uma distância horizontal maior na parte

superior do salto do que na parte inferior. Se um jogador salta com

uma velocidade inicial *v0* = 7,00 /s e um ângulo *80* = 35,0", que pocentagem do alcance do salto o jogador passa na metade suprior

(a)

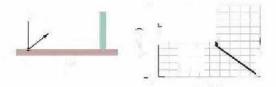
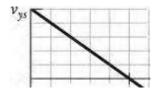
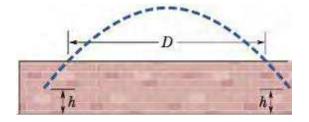
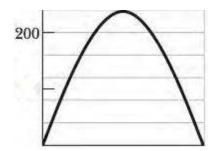
(b)

do salto (entre a altura máxima e metade da altura máxima)?

Figura 4-42 Problema 51.

••47 Um rebatedor golpeia uma bola de beisebol quando o centro

da bola esá 1,22 m acima do solo. A bola deixa o taco fazendo um

ângulo de 45º com o solo e com uma velocidade tal que o alcance * Para marcar *mield goal* no futebol americano, um jogador tem que fazer a horizontal (distância aé voltar à *altura de lançamento)* é 107 m. bola passar por cima do ravessão e entre as duas traves laterais. (N.T.)

•••52 Uma bola é lançada do solo em direção a uma parede que •57 Um carrossel de um parque de diversões gira em tomo de está a uma distância *x* (Fig. 443a). A Fig. 443b mosra a compo um eixo vertical com velocidade angular constante. Um homem nente *v* da velocidade da bola no instante em que alcançia a pa em pé na borda do carrossel tem uma velocidade escalar consante

Y

rede em unção da distância x. As escalas do gráico são deinidas de 3,66 m/s e uma aceleração cenrípeta *ã* de módulo 1,83 m/s2• O

por *v* , = 5,0 m/s ex, = 20 m. Qual é o ângulo do lançamento?

vetor posição *r* indica a posição do homem em relação ao eixo do

y

carrossel. (a) Qual é o módulo de *r*? Qual é o sentido de *r* quando

***ã* aponta (b) para leste e (c) para o sul?**

y

•58 Um ventilador realiza 1200 revoluções por minuto. Consi

"

dere um ponto situado na extremidade de uma das pás, que des

E o

creve uma circunferência com 0,15 m de raio. (a) Que distância

X

[illegible]

"

>

o ponto percorre em uma revolução? Quais são (b) a velocidade

(a)

;

,

- ***v***

do ponto e (c) o módulo da aceleração? (d) Qual é o período do

,

l

x(m)

movimento?

(b)

•59 Uma mulher se encontra em uma roda-gigante com 15 m de

Figua 4-43 Problema 52.

raio que completa cinco voltas em torno do eixo horizontal a cada

minuto. Quais são (a) o príodo do movimento, (b) o módulo e (c) o

•••53 Na Fig. 4-44, uma bola de beisebol é golpeada a uma altu sentido da aceleração centríeta no ponto mais alto, e (d) o módulo ra *h* = 1,00 m e apanhada na mesma altura. Deslocando-se para e (e) o sentido da acelerção cenrípeta da mulher no ponto mais lelamente a um muro, passa pelo alto do muro 1,00 s após ter sido baixo?

golpeada e, novamente, 4,00 s depois, quando está descendo, em •60 Um viciado em aceleração cenrípeta execua um movimento posições separadas por uma distância *D* = 50,0 m. (a) Qual é adis circular uniforme de período *T* = 2,0 s A e raio *r* = 3,00 m.

A

No instan-

tância horizontal percorida pela bola do instante em que foi gol te ti, a aceleração é ã = (6,00 m/s2)i +(-4,00 m/s2)j. Quais são, peada até ser apanhada? Quais são (b) o módulo e (c) o ângulo (em nesse instante, os valores de (a) *v* · ã e (b) *r* X *ã?*

relção à horizontal) da velocidade da bola imediatamente após ter •61 Quando uma grande estrela se torna uma *supenova,* o núsido golpeada? (d) Qual é a altura do muro?

cleo da esrela pode ser tão comprimido que ela se transforma em

uma *estrela de nêutrons,* com um raio de cerca de 20 m. Se uma

esrela de nêutrons completa uma revolução a cada segundo, (a)

qual é o módulo da velocidade de uma partícula situada no equador da estrela e (b) qual é o módulo da aceleração centrípeta da partícula? (c) Se a estrela de nêutrons gira mais depressa, as respostas dos itens (a) e (b) aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas?

Figua 4-44 Problema 53.

•62 Qual é o módulo da aceleração de um velocisa que core a 10

•••54 Uma bola é lançada a ptir do solo com uma certa veloci *ls* ao fazer uma curva com 25 m de raio?

dade. A Fig. 4-45 mostra o alcance *R* em função ao ângulo de lan ••63 Em t1 = 2,00 s, a aceleração de uma paícula em movimento A

A

çamento 0

circular no sentido anti-horio é (6,00 m/s2)i + (4,00 m/s2)j . A

0• O tempo de percurso depende do valor de *00;* seja tm,,

o maior valor possível desse tempo. Qual é a menor velocidade que parícula se move com velocidade escalar constante. Em t *2* = 5 ,00 s, A

A

a bola possui durante o percurso se 0

a aceleração é (4,00 m/s2

0 é escolhido de tal forma que

)i + (-6,00 m/s)j . Qual é o raio da tra-

o tempo de percurso seja 0,500t

jetóia da partícula se a diferença *t*

11x?

***2* - ti é menor que um período**

de rotação?

••4 Uma parícula descreve um movimento circular uniforme

em um plano horizontal *y.* Em um certo instante, a paícula passa

pelo ponto de coordenadas (4,00 m, 4,00 m) com uma velocidade

. 100

A

A

de -5,00i m/s e uma aceleração de + 12,5 j m/s. Quais são as co-

ordenadas (a) *x* e (b) *y* do centro da trajetóia circular?

o

••65 Uma bolsa a 2,00 m do centro e uma carteira a 3,00 m do

centro descrevem um movimento circular uniforme no piso de um

carrossel. Os dois objetos estão na mesma linha A radial. Em um

Figua 4-45 Problema 54.

A

certo instante, a aceleração da bolsa é (2,00 m/s2)i + (4,00 m/s2)j.

Qual é a aceleração da carteira nesse instante, em termos dos v e

•••55 Uma bola rola horizontalmente do alto de uma escada com tores unitários?

uma velocidade de 1,52 m/s. Os deraus têm 20,3 cm de alura e • •66 Uma paícula se move em uma rajetóia cicular em um sis20,3 cm de largura. Em que degrau a bola bate pimeiro?

tema de coordenadas *y* horizonal, com velocidade escalar constante. No instante t Seão 4-7 Movimento Cirular Uniforme

1 = 4,00 s, a partícula se encontra no ponto (5,00 m,

A

6,00 m) com velocidade (3,00 m/s)j e aceleração no sentido posiivo

•56 Um satélite da Terra se move em uma órbita circular, 640 m

A

de *x.* No instante *t2* = 10,0 s, tem uma velocidade (-3,00 m/s)i e acima da superfície da Terra, com um período de 98,0 n. Quais uma aceleração no sentido positivo de *y.* Quais são as coordenadas são (a) a velocidade e (b) o módulo da aceleração cenríeta dosa (a) *x* e (b) *y* do cenro da trajetóia circular se a diferença *t2* - ti é télite?

menor que um período de rotação?

•••67 Um menino faz uma pedra descrever uma circunferência

y

horizontal com 1,5 m de raio e uma alura de 2,0 m acima do chão.

A corda arrebenta e a pedra é arremessada horizontalmente, chegando ao solo depois de percorrer uma disância horizonal de 10

M

m. Qual era o módulo da aceleração centrípeta da pedra durante o

movimento circular?

•••68 Um gato pula em um carrossel que está descrevendo um

movimento circular uniforme. No instante *t1* = 2,00 s, a velocidade

A

A

do gato é i1 = (3,00 m/s)i + (4,00 m/s)j, medida em um sistema de

coordenadas horizontal *y.* No instante *t2* = 5,00 s, a velocidade é

p

A

A

v2 = (- 3,00 m/s)i + (-4,00 m/s)j. Quais são (a) o módulo da ace-

leração centrípeta do gato e (b) a aceleração média do gato no intervalo de tempo *t2* - *t1,* que é menor que um período de roação?

Seção 4-8 Movimento Relativo em Uma Dimensão

Figura 4-46 Problema 73.

•69 Um cineraista se enconra em uma picape que se move para

oeste a 20 h enquanto ilma um uepardo que também está se

movendo para oeste 30 h mais depressa que a picape. De re ••74 Depois de voar por 15 min em um vento de 42 km/h a um pente, o

ângulo de 20º ao sul do leste, o piloto de um avião sobrevoa uma

uepardo para, dá meia vola e passa a correr a 45 h

para leste, de acordo com a estimativa de um membro da equipe, cidade que está a *55* m ao norte do ponto de partida. Qual é a v e agora nervoso, que está na margem da estrada, no caminho do gue locidade escalar do avião em relação ao ar?

pardo. A mudança de velocidade do animal leva 2,0 s. Quais são ••75 Um rem viaja para o sul a 30 m/s (em relação ao solo) em (a) o módulo e (b) a orientação da aceleração do animal em relação meio a uma chuva que é soprada para o sul pelo vento. As traj e ao cinegraista e (c) o módulo e (d) a orientação da aceleração do tórias das gotas de chuva fazem um ângulo de 70º com a vertical animal em relação ao membro nervoso da equipe?

quando medidas por um observador estacionário no solo. Um o b

•70 Um barco esá navegando rio acima, no sentido positivo de servador no trem, entretanto, vê as gotas caírem exatamente na um eixo *x*, a 14 h em relação à á

vertical. Determine a velocidade escalar das gotas de chuva em

ua do rio. A água do rio está

correndo a 9,0 h em relação à margem. Quais são (a) o módulo relação ao solo.

e (b) a orientação da velocidade do barco em relação à margem? •• 76 Um avião pequeno atinge uma velocidade do ar de 500 km/h.

Uma criança que esá no barco caminha da popa para a proa a 6,0 O piloto pretende chegar a um ponto 800 m ao norte, mas descokm/h em relação ao barco. Quais são (c) o módulo e (d) a orientação bre que deve direcionar o avião 20,0º a leste do norte para atingir da velocidade da criança em relação à margem?

o destino. O avião chega em 2,00 h. Quais eram (a) o módulo e b)

••71 Um homem de aparência suspeita corre o mais depressa que a orientação da velcidade do vento?

pode por uma esteira rolante, levando 2,5 s para ir de uma extremi ••77 A neve está caindo verticalmente com uma velocidade consdade à outra. Os seguranças aparecem e o homem volta ao ponto de tante de 8,0 m/s. Com que ângulo, em relação à vertical, os locos partida, correndo o mais depressa que pode e levando 10,0 s. Qual de neve parecem estar caindo do ponto de vista do motorista de um é a razão entre a velocidade do homem e a velocidade da esteira? carro que viaja em uma estrada plana e retilínea a uma velocidade de 50 km/h?

Sção 4-9 Movimento Relativo em Duas Dimensões

••78 Na vista superior da Fig. 4-47, os jipes *P* e *B* se movem em

•72 Um jogador de rúgbi corre com a bola em di

linha reta em um terreno plano e passam por um guarda de fronteira

ção à meta do

adversário, no sentido positivo de um eixo *x*. De acordo com as re estacionário *A*. Em relação ao guarda, o jipe *B* se move com uma ras do jogo, pode passar a bola a um companheiro de equipe des velocidade escalar constante de 20,0 m/s e um ângulo *82* = 30,0º.

de que a velocidade da bola em relação ao campo não possua uma Também em relação ao guarda, *P* acelerou a partir do repouso a componentex positiva. Suponha que o jogador esteja correndo com uma axa constante de 0,400 m/s2 com um ângulo *81* = 60,0º. Em uma velocidade de 4,0 m/s em relação ao campo quando passa a um certo instante durante a aceleração, *P* possui uma velocidade bola com uma velocidade v

escalar de 40,0 m/s. Nesse instante, quais são (a) o módulo e (b) a

***81* em relação a ele mesmo. Se o módulo**

de v

orientação da velocidade de *P* em relação a *B* e (c) o módulo e (d) J é 6,0 m/s, qual é o menor ânulo que a bola deve fazer com

a direção *x* para que o passe seja válido?

a orientação da aceleração de *P* em relação a *B?*

••73 Duas rodovias se cruzam, como mosra a Fig. 4-46. No instante indicado, um caro de polícia P está a uma distância dp = 800

m do cruzamento, movendo-se com uma velocidade escalar *Vp* =

80 h. O motorista *M* está a uma distância *d.,1* = 600 m do cruzamento, movendo-se com uma velocidade escalar *V* = 60 h.

1

(a) Qual é a velocidade do motorista em relação ao carro da polícia

A

na noação de vetores uniários? (b) No insante mostrado na Fig.

4-46, qual é o ânulo entre a velocidade calculada no item (a) e a

reta que liga os dois carros? (c) Se os caros mantêm a velocidade,

as respostas dos itens (a) e (b) mudam quando os carros se aproxi-

mam da inerseção?

Figura 4-47 Problema 78.

••79 Dois navios, *A* e *B*, deixam o porto ao mesmo tempo . O na

40 "

vio *A* navega para noroeste a 24 nós e o navio *B* navega a 28 nós 1

'

em uma direção 40º a oeste do sul. (1 nó = 1 milha marítima por

y

1

hora; veja o Apêndice D.) Quais são (a) o módulo e b) a orientação

'

1

oeste do norte. Determine (a) o módulo e (b) a orientação da velo Figura 4-48 Problema 84.

cidade do barco em relação à margem. (c) Quanto tempo o barco

leva para aravessar o rio?

•••81 O navio *A* está 4,0 m ao norte e 2,5 km a leste do navio *B.* 85 Você foi sequestrado por estudantes de ciência política (que O navio *A* está viajando com uma velocidade de 22 km/h na direção estão aborrecidos porque você declarou que ciência política não é sul; o navio *B*, com uma velocidade de 40,0 km/h em uma direção ciência de verdade). Embora esteja vendado, você pode esimar a ve37º ao norte do leste. (a) Qual é a velocidade de *A* em relação a *B* locidade do carro dos sequesradores (pelo ronco do motor), o tempo A

em termos dos vetores unitários, com i apontando para o leste? (b) de viagem (conando mentalmente os segundos) e a orientação da A

A

Escreva uma expressão (em termos de i e j) para a posição de *A* viagem (pelas curvas que o carro fez). A partir dessas pistas, você em relação a *B* em função do tempo *t,* tomando *t* = O como o ins sabe que foi conduzido ao longo do seguinte percurso: 50 m/h por tante em que os dois navios estão nas posições antes descritas. (c) 2,0 n, curva de 90º para a direita, 20 km/h por 4,0 min, curva de Em que insante a separação entre os navios é mínima? (d) Qual é 90º para a direita, 20 m/h por 60 s, curva de 90º para a esquerda, a separação mínima?

50 m/h por 60 s, curva 90º para a direita, 20,0 km/h por 2,0 n,

•••82 Um rio de 200 m de largura corre com velocidade constante curva de 90º para a esquerda, 50 m/h por 30 s. Nesse ponto, (a) de 1,1 m/s em uma loresta, na direção leste. Um explorador deseja a que disância você se enconra do ponto de partida e (b) em que sair de uma pequena clareira na margem sul e aravessar o rio em dirção em relação à direção inicial você está?

um barco a motor que se move com uma velocidade escalar cons86 Na Fig. 4-49, uma estação de radar detecta um avião que se tante de 4,0 *mls* em relação à áua. Existe outra clareira na margem aproxima, vindo do leste. Quando é observado pela primeira vez, norte, 82 m rio acima do ponto de vista de um local da margem sul o avião está a uma distância *d1* = 360 m da estação e *81* = 40º aciexatamente em rente à segunda clareira. (a) Em que direção o bar ma do horizonte. O avião é rasreado durante uma variação anular co deve ser aponado para viajar em linha reta e chegar à clareira .8 = 123º no plano vertical leste-oeste; a disância no inal desta da margem norte? (b) Quanto tempo o barco leva para aravessar o variação é *d2* = 790 m. Deermine (a) o módulo e (b) a orientação rio e chegar à clareira?

do deslocamento do avião durante este período.

Problemas Adicionais

Aião

83 Uma mulher que é capaz de remar um barco a 6,4 km/h em

águas paradas se prepara para aravessar um rio retilíneo com 6,4

A

m de largura e uma correnteza de 3,2 km/h. Tome i perpendicu-

.1

E

A

lar ao rio e j apontando rio abaixo. Se a mulher pretende remar até

um ponto na oura margem exatamente em rente ao ponto de par-

Antena de radar

A

tida, (a) para que ângulo em relação a i deve apontar o barco e (b)

quanto tempo leva para fazer a ravessia? (c) Quanto tempo gastaria

se, permanecendo na mesma margem, remasse 3,2 km

Figura 4-49 Problema 86.

rio abaixo

e depois remasse de volta ao ponto de partida? (d) Quanto tempo

gastaria se, permanecendo na mesma margem, remasse 3,2 m *rio* 87 Uma bola de beisebol é golpeada junto ao chão. A bola atinge a *acima* e depois remasse de volta ao ponto de partida? (e) Para que altura máxima 3,0 s após ter sido golpeada. Em seuida, 2,5 s após ângulo deveria direcionar o barco para aravessar o rio no menor ter atingido a altura máxima, a bola passa rente a um alambrado tempo possível? () Qual seria esse tempo?

que está a 97,5 m do ponto onde foi golpeada. Suponha que o solo

84 Na Fig. 4 -48a, um renó se move no sentido negativo do eixo *x* é plano . (a) Qual é a altura máxima atingida pela bola? (b) Qual é a com uma velocidade escalar constante *v*, quando

alura do alambrado? (c) A que disância do alambrado a bola atinge

A uma bola

A

de gelo

é atirada do trenó com uma velocidade v

o chão?

0 = v0,i + v0'j em relação

ao trenó. Quando a bola chega ao solo, o deslocamento horizontal 88 Voos longos em latitudes médias no Hemisfério Norte enco n uh, em relação ao solo (da posição inicial à posição inal) é medido.

tram a chamada corrente de jato, um luxo de ar para leste que pode

A Fig. 4-48b mostra a variação de *ub,* com *v,*. Suponha que a bola afetar a velocidade do avião em relação à superície da Terra. Se o chegue ao solo na altura aproximada em que foi lançada. Quais são piloto mantém uma certa velocidade em relação ao ar (a chamada os valores (a) de V,e (b) de v *0'?* O deslocamento da bola em relação *velocidade o ar),* a velocidade em relação ao solo é maior quando ao renó, *ub,,* também pode ser medido. Suponha que a velocidade o voo é na dirção da corrente de jato e menor quando o voo é na do renó não mude depois que a bola foi airada. Quanto é *ub,* para direção oposta. Suponha que um voo de ida e vola esteja previsto *v,* iual a (c) 5,0 *mls* e (d) 15 m/s?

enre duas cidades separadas por 4000 km, com o voo de ida no

Qual foi a velocidade da corente de jato gar a *B* não mais do que 120 h após a partida para beber áua novausada nos cálculos?

mente. Para que cheue a *B* no último momento, quais devem ser

89 Uma parícula parte da origem no insante *t* = O com uma ve- () o módulo e (g) o sentido da velocidade média após o período de A

locidade de 8,0 j m/s e se move no plano *y* com uma aceleração descanso?

A

A

constante iual a (4, O i + 2, O j) m/s2• Quando a coordenada *x* da 94

- *Cortia* a *morte.* Um rande asteroide metálico colide

partícula é 29 m, quais são (a) a coordenada *y* e (b) a velocidade com a Terra e abre uma cratera no material rochoso abaixo do solo, escalar?

lançando pedras para o alto. A tabela a seguir mostra cinco pares de

90 Com que velocidade inicial o jogador de basquetebol da Fig. velocidades e ângulos (em relação à horizontal) para essas pedras, 4-50 deve aremessar a bola, com um ân

com base em um modelo de formação de crateras. (Outras pedras,

ulo 00 = 55° acima da horizontal, para converter o lance livre? As distâncias horizontais são com velocidades e ânulos intermediários, também são lançadas.) d

Suponha que você está em *x* = 20 km quando o asteroide chega ao

1 = 1,0 ft e d *2* = 14 ft e as aluras são hi = 7,0 ft e hi = 10 ft.

solo no instante *t* = O e na posição *x* = O (Fig. 4-52). (a) Em *t* = 20

s, quais são as coordenadas *x* e *y* das pedras, de *A* a *E*, que foram lançadas em sua direção? (b) Plote essas coordenadas em um gráico e desenhe uma curva passando pelos pontos para incluir pedras com velocidades e ângulos intermediários. A curva deve dar uma

ideia do que você veria ao olhar na direção das pedras e do que os

h2

dinossauros devem ter visto durante as colisões de asteroides com

a Terra, no passado remoto.

Pedra

Velocidade (m/s)

A

Angulo (graus)

Figura 4-50 Problema 90.

A

520

14,0

B

630

16,0

91 Durante as erupções vulcânicas, grandes pedaços de pedra po *e*

750

18,0

dem ser lançados para fora do vulcão; esses projéteis são conhecidos *D*

870

20,0

como *bombs vulcânics.* A Fig. 4-51 mostra uma seção ransver *E*

1000

22,0

sal do monte Fuji, no Japão. (a) Com que velocidade inicial uma

bomba vulcânica teria que ser lançada, com um ângulo 0 *0* = 35º

y

em relação à horizontal, a parir da cratera *A*, para cair no ponto *B*, a uma distância vertical *h* = 3,30 km e uma distânci a horizontal

***d* = 9,40 m? Inore o efeito do ar sobre o movimento do projétil.**

(b) Qual seria o tempo de percurso? (c) O efeito do ar aumentaria

rVoê

-- - - - -- -

-

[illegible] *X* (Jn)**

ou diminuiria o valor da velocidade calculada no item (a)?

o

10

20

Figura 4-52 Problema 94.

95 A Fig. 4-53 mosra a rajetória retilínea de uma partícula em um

sistema de coordenadas *y* quando a partícula é acelerada a partir do

repouso em um intervalo de tempo *.ti.* A aceleração é constante.

As coordenadas do ponto *A* são (4,00 m, 6,00 m) e as do ponto *B*

são (12,0 m, 18,0 m). (a) Qual é a razão *aJa*,

>

enre as componentes

d

B

da aceleração? (b) Quais são as coordenadas da partícula se o movimento coninua durante ouro intervalo igual a *.ti?*

Figua 4-51 Problema 91.

B

92 Um asronaua é posto em roação em uma cenrfuga hoizontal

y

com um raio de 5,0 m. (a) Qual é a velocidade escalar do asronauta

se a aceleração centrípeta tem um módulo de 7 *,Og?* (b) Quantas re

X

voluções por minuto são necessárias para produzir essa aceleração?

(c) Qual é o período do movimento?

Figura 4-53 Problema 95.

93 O oásis *A* está 90 km a oeste do oásis *B*. Um camelo parte de *A* e leva 50 h para caminhar 75 m na direção 37º ao norte do leste. 96 No voleibol feminino, o alto da rede está 2,24 m acima do piso Em seuida, leva 35 h para caminhar 65 km para o sul e descansa e a quadra mede 9,0 m por 9,0 m de cada lado da rede. Ao dar um por 5,0 h. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido do deslocamento saque viagem, uma jogadora bate na bola quando está 3,0 m acima do camelo em relação a *A* até o ponto em que para para descansar? do piso e a uma distância horizontal de 8,0 m da rede. Se a veloc i

Do instante em que o camelo parte do ponto *A* até o inal do período dade inicial da bola é horizontal, determine (a) a menor velocidade

PARTE 1

MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

89

escalar que a bola deve ter para ultrapassar a rede e (b) a máxima 104 Uma bola é lançada horizontalmente de uma altura de 20 m velocidade que pode ter para atingir o piso dentro dos limites da e chega ao solo com uma velocidade rês vezes maior que a inicial.

quadra do outro lado da rede.

Determine a velocidade inicial.

97 Um rile é aponado horizontalmente para um alvo a 30 m de 105 Um projétil é lançado com ua velocidade inicial de 30 /s distância. A bala atinge o alvo 1,9 cm abaixo do ponto para onde o e um ângulo de 60° acima da horizontal. Detemine (a) o módulo e rile foi apontado. Detemine (a) o tempo de percurso da bala e (b) (b) o ângulo da velocidade 2,0 s após o lançamento. (c) O ângulo do a velocidade escalar da bala ao sair do rile.

item (b) é acima ou abaixo da horizontal? Determine (d) o módulo

98 Uma partícula descreve um movimento circular uniforme e (e) o ângulo da velocidade 5,0 s após o lançamento . () O ângulo em tomo da origem de um sistema de coordenadas *y*, moven do item (e) é acima ou abaixo da horizontal?

do-se no sentido horário com um período de 7,00 s. Em um cer

A

106 O vetor posição de um próton é inicialmente *r* = 5,0i—

to instante, o vetor posição da partícula (em relação à origem) é

.

.

.

.

.

6,0j +2,0k e depois de tona r = -2,0i + 6,0j +2,0k, com todos

A

A

***r* = (2,00 m)i -(3,00 m)j. Qual é a velocidade da partícula nesse os valores em meros. (a) Qual é o vetor deslocamento do próton?**

instante, em termos dos vetores unitários?

(b) Esse vetor é paralelo a que plano?

99 Na Fig. 4-54, uma bola de massa de modelar descreve um mo 107 Uma partícula *P* se move com velocidade escalar constante vimento circular uniforme, com um raio de 20,0 cm, na borda de sobre uma circunferência de raio *r* = 3,00 m (Fig. 4-56) e compleuma roda que está girando no senido antihorário com um período ta uma revolução a cada 20,0 s. A parícula passa pelo ponto *O* no de 5,00 ms. A bola se desprende na posição correspondente a 5 ho instante *t* = O. Os vetores pedidos a seguir devem ser expressos na ras (como se estivesse no mosrador de um relógio) e deixa a roda a noação módulo-ângulo (ângulo em relação ao sentido positivo de uma altura *h* = 1,20 m acima do chão e a uma disância *d* = 2,50 m *x).* Determine o vetor posição da partícula, em relação a *O,* nos insde uma parede. Em que altura a bola bate na parede?

tantes (a) *t* = 5,00 s, (b) *t* = 7,50 s e (c) *t* = 10,0 s .

(d) Determine o deslocamento da partícula no intervalo de 5,00 s

entre o fim do quinto segundo e o fim do décimo segundo. Para esse

[illegible]

a

mesmo intervalo, determine (e) a velocidade média e a velocidade

()

ê

no início e (g) no m do intervalo. Finalmente, determine a acej

leração (h) no início e (i) no im do intervalo.

Massa

h

-

-

***d* -**

-

-*i*

y

Figura 4-54 Problema 99.

100 Um trenó a vela aravessa um lago gelado com uma aceleração

[illegible]

constante produzida pelo vento. Em um certo insante, a velocidade

r p

A

A

do trenó é (6, 30i -8, 42 j) /s. Três segundos depois, uma mudança

de direção do vento faz o trenó parar momentaneamente. Qual é a

aceleração média do trenó neste intervalo de 3,00 s?

101 Na Fig. 4-55, uma bola é lançada verticalmente para cima, a

-

-

**- [illegible]

__ X

o

partir do solo, com uma velocidade inicial v0 = 7,00 /s. Ao mesmo tempo, um elevador de serviço começa a subir, a parir do solo, Figura 4-56 Problema 107.

com uma velocidade consante *v,* = 3,00 /s. Qual é a altura máxima aingida pela bola (a) em relação ao solo e (b) em relação ao 108 Um rem francês de alta velocidade, conhecido como TGV

piso do elevador? Qual é a taxa de variação da velocidade da bola *(Train à Grande Vitesse),* viaja a uma velocidade média de 216

(c) em relação ao solo e (d) em relação ao piso do elevador?

km/h. (a) Se o trem az uma curva a essa velocidade e o módulo da

aceleração sentida pelos passageiros pode ser no máximo *0,050g,*

-

qual é o menor raio de curvatura dos rilhos que pode ser tolerado?

(b) Com que velocidade o rem deve fazer uma curva com 1,00 km

de raio para que a aceleração esteja no limite permitido?

Vo

Bola

109 (a) Se um elétron é lançado horizontalmente com uma velocidade de 3,0 X 106 /s, quantos metros cai o eléron ao percorrer uma disância hoizontal de 1,0 m? (b) A distância calculada no item

Figura 4-55 Problema 101.

(a) aumena, diminui ou permanece a mesma quando a velocidade

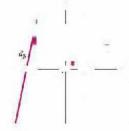
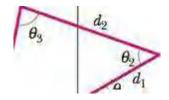
102 Um campo magnético pode forçar uma partícula a descrever inicial aumenta?

uma rajetória circular. Suponha que um elétron que está descre 1 10 Uma pessoa sobe uma escada rolante enguiçada, de 15 m de vendo uma circunferência sofra uma aceleração radial de módulo comprimento, em 90 s. Ficando parada na mesma escada rolante, 3,0 X 1014 /s2 sob o efeito de um campo magnético. (a) Qual é o depois de conserada, a pessoa sobe em 60 s. Quanto tempo a pessoa módulo da velocidade do elétron se o raio da rajetória circular é leva se subir com a escada em movimento? A resposta depende do 15 cm? (b) Qual é o período do movimento?

comprimento da escada?

103 Em 3,50 h, um balão se desloca 21,5 m para o norte, 9,70 1 1 1 (a) Qual é o módulo da aceleração centrípea de um objeto no m para leste e 2,88 km para cima em relação ao ponto de lança equador da Terra devido à rotação de nosso planeta? (b) Qual devemento. Determine (a) o módulo da velocidade média do balão e (b) ria ser o período de rotação da Terra para que um objeto no equador o ângulo que a velocidade média faz com a horizontal.

tivesse uma aceleração centrípeta com um módulo de 9,8 /s2?

-

112 -

O alcance de um projétil depende, não só de *v*

tal horizontais eletricamente carregadas. Nessa região, o elétron

0* e *80,

mas também do valor *g* da aceleração em queda livre, que varia percorre uma distância horizontal de 2,00 cm e sofre uma acelede lugar para lugar. Em 1936, Jesse Owens estabeleceu o recorde ração constante para baixo de módulo 1,00 X 1017 cm/s2 devido mundial de salto em distância de 8,09 m nos Jogos Olímpicos de às placas carregadas. Determine (a) o tempo que o elétron leva Berlim, onde *g* = 9,8128 m/s2• Supondo os mesmos valores de v

para percorrer os 2,00 cm; (b) a distância vertical que o elétron

***0* e**

***80,* que distância o atlea teria pulado em 1956, nos Jogos Olmpicos percorre durante esse tempo; o módulo da componente (c) horide Melboune, onde *g* = 9,7999 m/s2?**

zontal e (d) vertical da velocidade quando o elétron sai da região

113 A Fig. 4-61 mosra a rajetória seguida por um gambá bêbado entre as placas.

em um terreno plano, de um ponto inicial *i* até um ponto nal/ Os 1 1 6
Um elevador sem teto esá subindo com uma velocidade cons

ângulos são *8*

tante de 10 m/s. Um menino que está no elevador arremessa uma

***1* = 30,0º, *82* = 50,0º e 83 = 80,0º; as distâncias são**

d

bola para cima, na vertical, de uma alura 2,0 m acima do piso do

***1* = 5,00 m, *d2* = 8,00 m e d3 = 12,0 m. Quais são (a) o módulo e**

(b) o ângulo do deslocamento do bêbado *dei* atéf?

elevador, no instante em que o piso do elevador se enconra 28 m

acima do solo. A velocidade inicial da bola em relação ao elevador

y

é 20 m/s. (a) Qual é a altura máxima acima do solo atingida pela

bola? (b) Quanto tempo a bola leva para cair de volta no piso do

elevador?

1 17 Um jogador de futebol americano chuta uma bola de tal forma

que a bola passa 4,5 s no ar e chega ao solo a 46 m de distância. Se

--4L-_

***,* · _**

_ *x*

a bola deixou o pé do jogador 150 cm acima do solo, determine (a)

i

o módulo e (b) o ângulo (em relação à horizontal) da velocidade

inicial da bola.

118 Um aeroporto dispõe de uma esteira rolante para ajudar os

passageiros a atravessarem um longo corredor. Lauro não usa a es

Figua 4-57 Problema 113.

f

teira rolante e leva 150 s para atravessar o coredor. Cora, que ica

parada na esteira rolante, cobre a mesma distância em 70 s . Mar

114 A posição *r*

a prefere andar na esteira rolante. Quanto tempo leva Marta para

A

de uma partícula

A

que se move no plano *y* é dada

por *r* = *2ti* + 2 sen[(*r/4* rad/s)t]j, onde *r* está em metros e *tem* se-
aravessar o corredor? Suponha que Lauro e Marta caminham com
gundos. (a) Calcule os valores das componentes *x* e *y* da posição a
mesma velocidade.

da partícula para *t* = O; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 s e plote a trajetória da 1 19
Um vagão de madeira está se movendo em uma linha férpartícula no
plano *y* para o intervalo O s *t* s 4,0. (b) Calcule os rea retilínea com

velocidade v valores das componenes da velocidade da partícula para *t* = 1,0;

***1*• Um franco-atirador dispara uma**

bala (com velocidade inicial v

2,0 e 3,0 s. Mostre que a velocidade é tangente à rajetória da partí2) contra o vagão, usando um rile de alta potência. A bala atravessa as duas paredes laterais e os

cula e tem o mesmo senido que o movimento da parícula em todos furos de entrada e saída icam à mesma distância das exremidaesses instantes traçando os vetores velocidade no gráico da traje des do vagão. De que direção, em relação à linha férrea, a bala tória da partícula, plotado no item (a). (c) Calcule as componentes foi disparada? Suponha que a bala não foi desviada ao penetrar da aceleração da parícula nos instantes *t* = 1,0; 2,0 e 3,0 s.

no vagão, mas a velocidade diminuiu 20%. Suponha ainda que

115 Um elétron com uma velocidade horizontal inicial de mó v *1* = 85 /h e v *2* = 650 m/s. (Por que não é preciso conhecer a dulo 1,00 X 109 cm/s penetra na região entre duas placas de me-largura do vagão?)

FORÇA E

Q

5

CA P Í T U LO

M OV I M E NTO 1

o U E É FÍSICA?

Vimos que a física envolve o estudo do movimento dos objetos, incluindo a

aceleração, que é uma variação de velocidade. A física ambém envolve o estudo da

***casa* da aceleração. A causa é sempre uma força, que pode ser definida, em termos coloquiais, como um empurrão ou um puxão exercido sobre um objeto. Dizemos**

que a força *age* sobre o objeto, mudando a velocidade. Por exemplo: na largada de

uma prova de Fórmula 1, uma força exercida pela pista sobre os pneus raseiros provoca a aceleração dos veículos. Quando um zagueiro segura o cenroavante do time adversário, uma força exercida pelo defensor provoca a desaceleração do atacante.

Quando um carro colide com um poste, uma força exercida pelo poste faz com que

o carro pare bruscamente. As revistas de ciência, engenharia, direito e medicina estão repletas de arigos sobre as forças a que estão sujeitos os objetos, enre os quais podem ser incluídos os seres humanos.

5-2 Mecânica Netoniana

A relação que existe enre uma força e aceleração produzida por essa força foi descoberta por Isaac Newton (142-1727) e é o assunto deste capítulo. O estudo da relação, da forma como foi apresentada por Newton, é chamado de *mecânica newtoniana.* Vamos nos concentrar inicialmente nas rês leis básicas de movimento da

 .

.

mecamca newtomana.

A mecânica newtoniana não pode ser aplicada a todas as situações. Se as velocidades dos corpos evolvidos são muito elevadas, comparáveis à velocidade da luz, a mecânica newtoniana dve ser subsituída pela teoria da relaividade resrita de

Einstein, que é válida para qualquer velocidade. Se os corpos envolvidos são muito

pequenos, de dimensões atômicas ou subatómicas (como, por exemplo, os elérons

de um átomo), a mecânica newtoniana deve ser subsituída pela mecânica quântica.

Atualmente, os ísicos consideram a mecânica newtoniana um caso especial dessas

duas teorias mais abrangentes. Ainda assim, rata-se de um caso especial muito imporante, já que pode ser aplicado ao estudo do movimento dos mais diversos objetos, desde corpos muito pequenos (quase de dimensões atômicas) até corpos muito randes (galáxias e aglomerados de galáxias).

5-3 A Primeira Lei de Newton

Antes de Newton formular sua mecânica, pensava-se que uma inluência, uma "for

ça", era necessária para manter um corpo em movimento com velocidade constante

e que um corpo estava em seu "estado natural" apenas quando se encontrava em

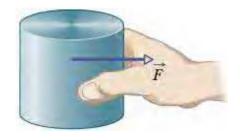
repouso. Para que um corpo se movesse com velocidade constante, tinha que ser

impulsionado de alguma forma, puxado ou empurrado; se não fosse assim, pararia

"naturalmente".

Essas ideias pareciam razoáveis. Se você faz um disco de metal deslizar em uma

superfície de madeira, o disco realmente diminui de velocidade até parar. Para que

91

continue a deslizar indefinidamente com velocidade constante, deve ser empurrado

ou puxado continuamente.

Por outro lado, se o disco for lançado em um ringue de patinação, percorrerá

uma distância bem maior antes de parar. É possível imaginar superfícies mais escorregadias, nas quais o disco percorreria distâncias ainda maiores. No limite, podemos pensar em uma superfície extremamente escorregadia (conhecida como superície

sem atrito), na qual o disco não diminuiria de velocidade. (Podemos, de fato, chegar muito perto dessa situação fazendo o disco deslizar em uma mesa de ar, na qual é sustentado por uma corente de ar.)

A partir dessas observações, podemos concluir que um corpo manterá seu estado

de movimento com velocidade constante se nenhuma força agir sobre ele. Isso nos

leva à primeira das três leis de Newton.

Primeira Lei de Neton Se nenhuma força aua sobre um corpo, sua velocidade não

pode mudar, ou seja, o corpo não pode sorer uma aceleração.

Em outras palavras, se o corpo está em repouso, permanece em repouso; se está em

movimento, coninua com a mesma velocidade (mesmo módulo *e* mesma orienta

ção).

5-4 Força

Vamos agora defmir a unidade de força. Sabemos que uma força pode causar a aceleração de um corpo. Assim, defnos a unidade de força em termos da aceleração que uma força imprime a um corpo de referência, que tomamos como sendo o quilorama-padrão da Fig. 1-3. A esse corpo foi atribuída, exatamente e por definição,

-

uma massa de l kg.

Colocamos o corpopadrão sobre uma mesa horizontal sem atrito e o puxamos

a

para a direita Fig. 5-1) até que, por tenaiva e erro, adquira uma aceleração de 1

Figua 5-1 Uma força *F* aplicada

m/s2• Declaramos então, a ítulo de deinição, que a força que estamos exercendo

ao quilograma-padrão provoca uma

sobre o corpopadrão tem um módulo de 1 newton (1 N).

aceleração *ã*.

Podemos exercer uma força de 2 N sobre nosso corpopadrão puxando-o até

a aceleração medida de 2 m/s2, e assim por diante. No caso geral, se nosso corpopadrão de massa igual a 1 kg tem uma aceleração de módulo *a*, sabemos que uma força *F* está agindo sobre o corpo e que o módulo da força (em newtons) é igual ao

módulo da aceleração (em meros por segundo quadrado).

Uma força é medida, portanto, pela aceleração que produz. Enretanto, a aceleração é uma grandeza vetorial, pois possui um módulo e uma orientação. A força também é uma grandeza vetorial? Podemos facilmente atribuir uma orientação a

uma força (basa aribuir-lhe a orientação da aceleração), mas isso não é suiciente.

Devemos provar experimentalmente que as forças são grandezas vetoriais. Na realidade, isso foi feito há muito tempo. As forças são realmente randezas vetoriais: possuem um módulo e uma orientação e se combinam de acordo com as regras vetoriais do Capítulo 3.

Isso signiica que, quando duas ou mais forças atuam sobre um corpo, podemos

calcular a força total, ou força resultante, somando vetorialmente as forças. Uma

única força com o módulo e a orientação da força resultante tem o mesmo efeito

sobre um corpo que todas as forças agindo simultaneamente. Este fato é chamado

de princípio de superposição para forças. O mundo seria muito esranho se, por

exemplo, você e oura pessoa puxassem o corpopadrão na mesma orienação, cada

um com uma força de 1 N, e a força resulante fosse 14 N.

Neste livro, as forças são quase sempre represenadas por um símbolo como *F*

e as força resultantes por um símbolo como *.s·* Assim como acontece com ouros

vetores, uma força ou uma força resultante pode ter componentes em relação a um

sistema de coordenadas. Quando as forças atuam apenas em uma direção, possuem

apenas uma componente. Nesse caso, podemos dispensar a seta sobre os símbolos

das forças e usar apenas sinais para indicar o senido das forças ao longo do único

eixo. Um enunciado mais rigoroso da Primeira Lei de Newton da Seção 5-3, baseado

na ideia de força resultante, é o seguinte:

Primeira Lei de Newton Se nenhuma força *resultante* atua sobre um corpo (F. = 0), a velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não pode sofrer uma aceleração.

Isso signiica que mesmo que um corpo esteja submetido a váias forças, se a resultante

dessas forças for zero, o corpo não sorerá uma aceleração.

Referenciais Inerciais

A primeira lei de Newton não se aplica a todos os referenciais, mas podemos sempre

enconrar referenciais nos quais essa lei (na verdade, toda a mecânica newtoniana) é

verdadeira. Esses referenciais são chamados de referenciais inerciais.

Referencial inercial é um referencial para o qual as leis de Newton são válidas.

Por exemplo: podemos supor que o solo é um referencial inercial, desde que possamos

desprezar os movimentos astronômicos da Terra (como a rotação e a translação).

Esta hipótese é válida se, digamos, fazemos deslizar um disco melico em uma

pista *cur,* de gelo (supondo que a resistência que o gelo oferece ao movimento seja

tão pequena que pode ser desprezada); descobrimos que o movimento do disco obedece às leis de Newton. Suponha, porém, que o disco deslize sobre uma *longa* pista de gelo a parir do polo norte (Fig. 5-2a). Se observamos o disco a partir de um referencial estacionário no espaço, constataremos que o disco se move para o sul ao longo de uma trajetória retilínea, já que a rotação da Terra em tomo do polo norte

simplesmente faz o gelo escorregar por baixo do disco. Entreanto, se observamos o

disco de um ponto do solo, que acompanha a rotação da Tera, a rajetória do disco

não é uma reta. Como a velocidade do solo sob o disco, dirigida para leste, aumenta

com a distância enre o disco e o polo, do nosso ponto de observação ixo no solo o

disco parece sorer um desvio para oeste (Fig. *5-2b)*. Essa deflexão aparente não é

causada por uma força, como exigem as leis de Newton, mas pelo fato de que observamos o disco a partir de um referencial em rotação. Nessa situação, o solo é um referencial não inercial.

-

Neste livro, supomos quase sempre que o solo é um referencial inercial e que

as forças e acelerações são medidas neste referencial. Quando as medidas são executadas em um referencial não inercial, como, por exemplo, um elevador acelerado em relação ao solo, os resultados podem ser surpreendentes.

Figua 5-2 *(a)* A trajetória de um

disco que escorrega a partir do

polo norte, do ponto de vista de um

A rotação da Terra

observador esacionário no espaço . A

causa um desvio

Terra gira para leste. *(b)* A ajetória

aparente.

do disco do ponto de vista de um

(a)

(b)

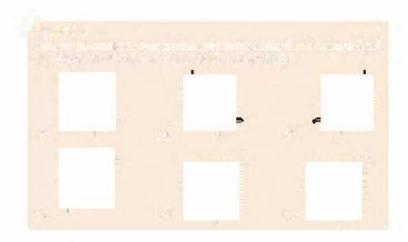
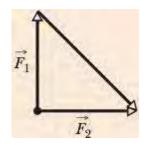
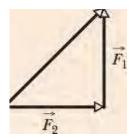
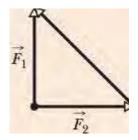
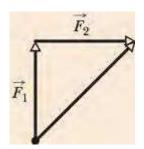
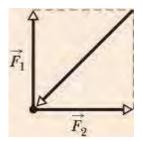
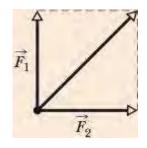
observador no solo.

$\vec{F}_1$
$\vec{F}_2$

$\vec{F}_1$
$\vec{F}_2$

$\vec{F}_1$
$\vec{F}_2$

$\vec{F}_2$
$\vec{F}_1$

$\vec{F}_1$
$\vec{F}_2$

$$\frac{m_X}{m_0} = \frac{a_0}{a_X}$$

-TESTE 1

Quais dos seis arranjos da iura mostram corretamente a soma vetorial das forças i e F *2*

para obter um terceiro vetor, que epresenta a força resultante *Fe,?*

(a)

(b)

(e)

(d)

(e)

(/)

5-5 Massa

A experiência nos diz que uma dada força produz acelerações de módulos diferentes

em corpos diferentes. Coloque no chão uma bola de futebol e uma bola de boliche

e chute as duas. Mesmo que você não faça isso de verdade, sabe qual será o resultado: a bola de futebol receberá uma aceleração muito maior que a bola de boliche.

As duas acelerações são diferentes porque a massa da bola de futebol é diferente da

massa da bola de boliche; mas o que, exatamente, é a massa?

Podemos explicar como medir a massa imaginando uma série de experimentos

em um referencial inercial. No primeiro experimento, exercemos uma força sobre

um corpo padrão, cuja massa mo é deinida com 1,0 kg. Suponha que o corpo padrão

sofra uma aceleração de 1,0 m/s2• Podemos dizer então que a força que atua sobre

esse corpo é 1,0 N.

Em seguida, aplicamos a mesma força (precisaríamos nos ceriicar, de alguma

forma, de que a força é a mesma) a um segundo corpo, o corpo *X*, cuja massa não é conhecida. Suponha que descobrimos que esse corpo sofre uma aceleração de 0,25

m/s2• Sabemos que uma bola de futebol, que possui uma *mssa menor,* adquire uma

***aceleação maior* que uma bola de boliche, quando a mesma força (chute) é aplicada**

a ambas. Vamos fazer a seguinte conjectura: a razão entre as massas de dois corpos é

igual ao inverso da razão enre as acelerações que adquirem quando são submetidos

à mesma força. Para o corpo *X* e o corpo padrão, isso signiica que

Explicitando *mx*, obtemos

a

l ,O

0

01/s1

***tnx* = *n10* - = (1,0 kg) 0 25 *1* 2 = 4,0 kg.**

ax

, m s

Nossa conjecura será útil, evidentemente, apenas se coninuar a ser válida quando a força aplicada assumir ouros valores. Por exemplo: quando aplicamos uma força de 8,0 N a um corpo padrão, obtemos uma aceleração de 8,0 m/s2• Quando a

força de 8,0 N é aplicada ao corpo *X*, obtemos uma aceleração de 2,0 m/s2• Nossa conjectura nos dá, poranto,

a0

8,0 m/s2

***m.x* = *n10* - = (1,0 kg) 2 0 1 1 = 4,0 kg,**

ax

, m s

o que é compaível com o primeiro experimento. Muitos experimentos que fome-

$$\vec{F}_{res} = m\vec{a}$$

$$F_{res,x} = ma_x, \quad F_{res,y} = ma_y, \quad e \quad F_{res,z} = ma_z,$$

cem resultados semelhantes indicam que nossa conjectura é uma forma coniável de

aribuir uma massa a um dado corpo.

Nossos experimentos indicam que massa é uma propriedade *intrínseca* de um

corpo, ou seja, uma caracterísica que resulta automaticamente da existência do corpo. Indicam também que a massa é uma randeza escalar. Contudo, uma pegunta inrigante permanece sem resposta: o que, exatamente, é massa?

Como a palavra *massa* é usada na vida cotidiana, devemos ter uma noção intuitiva de massa, talvez algo que podemos sentir isicamente. Seria o amanho, o peso ou a densidade do corpo? A resposta é negaiva, embora algumas vezes essas caracterísicas sejam confundidas com a massa. Podemos apenas dizer que *a mssa de um corpo é a proprieade que reaciona uma força que age sobre o corpo à aceleração*

***resultante.* A massa não tem uma deinição mais coloquial; você pode ter uma sensação ísica da massa apenas quando tenta acelerar um corpo, como ao chutar uma bola de futebol ou uma bola de boliche.**

5-6 A Segunda Lei de Neton

Todas as definições, experimentos e observações que discutimos até aqui podem ser

resumidos em uma única sentença:

Segunda Lei de Neton A força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto

da massa do corpo pela aceleração.

Em termos matemáicos,

(segunda lei de Newton).

(5-1)

Esta equação é simples, mas dvemos usá-la com cautela. Primeiro, devemos

escolher o corpo ao qual vamos aplicá-la; F,._, deve ser a soma vetorial de *todas* as forças que atuam sobre *esse* corpo. Apenas as forças que atuam sobre *esse* corpo devem ser incluídas na soma vetorial, não as forças que agem sobre ouros corpos

envolvidos na mesma situação. Por exemplo: se você disputa a bola com vários adversários em um jogo de futebol, a força resultante que age sobre *você* é a soma vetorial de todos os empurrões e puxões que *você* recebe. Ela não inclui um empurrão ou puxão que você dá em ouro jogador. Toda vez que resolvemos um problema que

envolve forças, o primeiro passo é der claramente a que corpo vamos aplicar a

segunda lei de Newton.

Como outras equações vetoriais, a Eq. 5-1 é equivalente a três equações para as

componentes, uma para cada eixo de um sistema de coordenadas yz:

(5-2)

Cada uma dessas equações relaciona a componente da força resultante em relação

a um eixo à aceleração ao longo do mesmo eixo. Por exemplo: a primeira equação

nos diz que a soma de todas as componentes das forças em relação ao eixo *x* produz a componente *a* . da aceleração do corpo, mas não produz uma aeleração nas direções *y* e *z.* Sendo assim, a componente *a* . da aceleração é causada apenas pelas componentes das forças em relação ao eixo *x.* Generalizando,

A componente da aceleração em relação a um dado eixo é causada *peas* pela soma das componentes das forças em relação a *esse* eixo e não por componentes de forças em relação a qualquer outro eixo.

A Equação 5-1 nos diz que se a força resultante que age sobre um corpo é nula,

a aceleração do corpo ã = O. Se o corpo está em repouso, permanece em repouso;

se está em movimento, continua a se mover com velocidade constante. Em tais casos, as forças que agem sobre o corpo se *copensam* e dizemos que o corpo esá em *equilbrio.* Frequentemente, dizemos que as forças se *cancelam,* mas o termo "cancelar" pode ser mal interpretado. Ele *não* significa que as forças deixaram de exisir (cancelar forças não é como cancelar uma reserva em um restaurante). As forças

continuam a agir sobre o corpo.

Em unidades do SI, a Eq. 5-1 nos diz que

1 N = (1 kg)(l 111/s2) = 1 kg· 111/s2•

(5-3)

Algumas unidades de força em ouros sistemas de unidades aparecem na Tabela

5-1 e no Apêndice D.

Tabela 5-1

Unidades da Segunda Lei de Neton (Eqs. 5-1 e 5-2)

Sistema

Força

Massa

Aceleração

SI

newton (N)

quilograma (kg)

Js2

CGS•

dina

grama (g)

cm/s2

Britânicob

libra (lb)

slug

f/s2

•1 dina = 1 g · cmfs2.

bJ libra = 1 slug · ft/s2•

Muitas vezes, para resolver problemas que envolvem a segunda lei de Newton,

desenhamos um diagrama de corpo livre no qual o único corpo mostrado é aquele para o qual estamos somando as forças. Um esboço do próprio corpo é preferido por alguns professores, mas, para poupar espaço nestes capítulos, representaremos

quase sempre o corpo por um ponto. Além disso, as forças que agem sobre o corpo

serão representadas por setas com a origem no ponto. Um sistema de coordenadas

é normalmente incluído e a aceleração do corpo é algumas vezes mosrada através

de outra sea (acompanhada por um símbolo adequado para mostrar que se traa de

uma aceleração).

Um sistema é formado por um ou mais corpos; qualquer força exercida sobre

os corpos do sistema por corpos que não pertencem ao sistema é chamada de força

extena. Se os corpos de um sistema estão rigidamente ligados uns aos ouros, podemos ratar o sistema como um único corpo e a força resultante F,, a que está submetido esse corpo é a soma vetorial das forças extenas. (Não incluímos as foras intenas, ou seja, as forças entre dois corpos pertencentes ao sistema.) Assim, por

exemplo, uma locomotiva e um vagão formam um sistema. Se, digamos, um reboque

puxa a locomoiva, a força xercida pelo reboque age sobre o sistema locomotiva-vagão. Como acontece no caso de um só corpo, podemos relacionar a força resultante extena que age sobre um sistema à aceleração do sistema aravés da segunda lei de

Newton, Fe, = mã, onde *m* é a massa total do sistema.

TESTE 2

A figura mostra duas forças horizontais auando

em um bloco apoiado em um piso sem arito. Se

3N --, 5 N

uma terceira força horizontal ; ambém age sobre

'

i

o bloco, determine o módulo e a orientação de F *3*

se o bloco esá (a) em repouso e (b) se movendo para a esquerda com uma velocidade

constante de 5 m/s.

$$F_1 = ma_x,$$

$$F_{res,\,x} = ma_x.$$

(e)

(f)

$$a_x = \frac{F_1 - F_2}{}$$

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - 1

97

Exemplo

Forças alinhadas: disco metálico

Nas partes A, B e C da Fig. 5-3, uma ou duas forças agem Os diagramas de corpo livre para as três situações são sobre um disco metálico que se move sobre o gelo sem também mosrados na Fig. 5-3, com o disco representado arito ao longo do eixo *x,* em um movimento unidimen-por um ponto.

sional. A massa do disco é *m* = 0,20 kg. As forças ; e

***i* atuam ao longo do eixo x e têm módulos F *1* = 4,0 N e *Situaão A* Para a situação da Fig. *5-3b,* em que existe F2 = 2,0 N. A força i faz um ângulo } = 30° com o eixo apenas uma força horizonal, temos, de acordo com a Eq.**

x e tem um módulo *F3* = 1,0 N. Qual é a aceleração do 5-4 '

disco em cada situação?

IDEIA-CHAVE

o que, para os dados do problema, nos dá

Em todas as situações, podemos relacionar a aceleração

ã à força resultante *Fs* que age sobre o disco através da

_ F1 _ 4,0 N _ O 2 (Resposta)

segunda lei de Newton, '

a

es = *ã* . Entretanto, como o

·• - - - 0 20 . - 2 111/s •

n

, kg

movimento ocorre apenas ao longo do eixo *x,* podemos A resposta posiiva indica que a acelração ocorre no sensimplificar as situações escrevendo a segunda lei apenas ido positivo do eixo *x.*

para as componentes x:

(5-4) *Situaão 8* Na Fig. *5-3d,* duas forças horizontais agem

) - 2,0 N

[illegible]

se opõe a F

0,20 kg

= -5,7 m/s2•

2.

(Resposta)

Assim, a força resultante acelera o disco no sentido negativo

Este é um diagrama

de corpo livre.

do eixox.

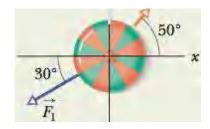
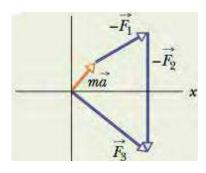
Figua 5-3 Em três situações, forças atuam sobre um disco

que se move ao longo do eixo *x.* A figura mosra também

*** O disco não é acelerado na ão *y* porque a componente *y* da força ;**
diagramas de copo livre.

é equilibrada ela força normal, que será discuida na Seção 5-7. (N.T.) -

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = m\vec{a},$$

$$\vec{F}_3 = m\vec{a} - \vec{F}_1 - \vec{F}_2.$$

Exemplo

Forças não alinhadas: lata de biscoitos

Na vista superior da Fig. *5-4a*, uma lata de biscoitos de *Componentes x* Para o eixo *x*, temos: 2,0 kg é acelerada a 3,0 /s2, na orientação definida por ã,

em uma superfície horizontal sem atrito. A aceleração

F3.x = max - F1.x - Fz..r

é

causada por rês forças horizontais, das quais apenas duas

= ,*n(a* cos 50°) - [illegible] cos(-150°) - *F2* cos 90".

são mosradas: _, de módulo 10 N, e *z,* de módulo 20 N. Subsituindo os valores conhecidos, obtemos Qual é a terceira força, ' 3, em termos dos vetores unitários F

e na notação módulo-ângulo?

3_.r = (2,0 kg){3,0 m/s2) cos *50º* - (10 N) cos(-150º)

- (20 N) cos 90°

= 12,5 N.

IDEIA-CHAVE

Componentes y **Para o eixo *y,* temos:**

A força resultante *Fs* que age sobre a lata é a soma das *F*

três forças e está relacionada à aceleração ã pela segunda

-

3.,, = *,nay - F1,y - F2.y*

lei de Newton (; ••

= *n.(a* sen 50º) - }", scn(-150º) - }z scn 90°

= *ã),* Assim,

= (2,0 kg)(3,0 m/s2) sen 50° - (10 N) sen(-150°)

(5-6)

- (20 N) sen 90°

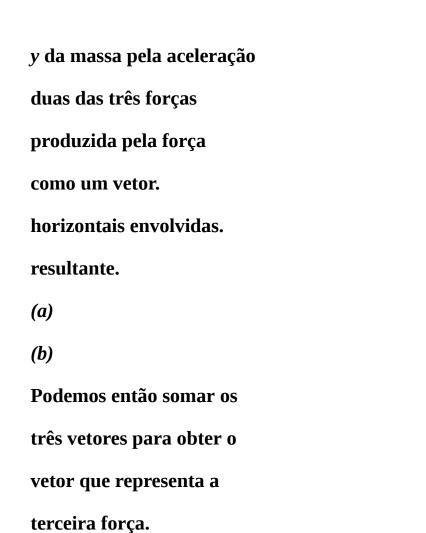
o que nos dá

soma poderia ser feia com o auxílio de uma calculadora, 3-6 para obter o módulo e o ângulo (em relação ao semieijá que conhecemos tanto o módulo como o ângulo dos três xo *x* positivo): vetores. Enretanto, optamos por calcular o lado direito da

Eq. 5-7 em termos das componentes, primeiro para o eixo

, = V

F *2* + F *1* = 16 N

3

Figua 5-4 *(a)* Visa superior de duas das rês forças que agem sobre uma laa de biscoitos, produzindo uma aceleração *ã. F3*

não é mosrada. *(b)* Um arranjo de vetores *mã, - i* e *-t* para determinar a força ' 3•

$F_{res,y} = ma_y.$

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - 1

99

5-7 Algumas Forças Especiais

Foça Gvitacional

A força gravitacional *g* exercida sobre um corpo é um ipo especial de atração que um segundo corpo exerce sobre o primeiro. Nestes capítulos iniciais, não discuimos

a natureza dessa força e consideramos apenas situações nas quais o segundo corpo

é a Terra. Assim, quando falamos da força ravitacional *Fg* que age sobre um corpo, estamos nos referindo à força que o atrai na direção do cenro da Terra, ou seja, verticalmente para baixo. Vamos supor que o solo é um referencial inercial.

Considere um corpo de massa *m* em queda livre, submetido, portanto, a uma

aceleração de módulo *g.* Nesse caso, se desprezarmos os efeitos do ar, a única força

que age sobre o corpo é a força gravitacional *g.* Podemos relacionar essa força à

-

aceleração correspondente aravés da segunda lei de Nwton, Fs = mã. Colocamos

um eixo *y* verical ao longo da trajetória do corpo, com o sentido posiivo para cima.

Para este eixo, a segunda lei de Newton pode ser escrita na forma F,es,y = *may,* que, em nossa situação, se toma

-F1 = 111(-g)

ou

[illegible] *111g.***

(5-8)

Em palavras, o módulo da força graviacional é igual ao produto *mg.*

Esta mesma força gravitacional, com o mesmo módulo, atua sobre o corpo mesmo quando não esá em queda livre, mas se enconra, por exemplo, em repouso sobre uma mesa de sinuca ou movendo-se sobre a mesa. (Para que a força gravitacional

desaparecesse, a Terra teria que desaparecer.)

Podemos escrever a segunda lei de Newton para a força gravitacional nas seguintes formas vetoriais:

-

•

.

A

[illegible] -FR.i = -,ngj = 111g·.***

(5-9)

A

onde j é o vetor unitário que aponta para cima ao longo do eixo *y*, perpendicularmente ao solo, e g é a aceleração de queda livre (escrita como um vetor), dirigida

para baixo.

Peso

O peso *P* de um corpo é o módulo da força necessária para impedir que o corpo

caia livremente, medida em relação ao solo. Assim, por exemplo, para manter uma

bola em repouso em sua mão enquanto você está parado de pé, você deve aplicar

uma força para cima para equilibrar a força gravitacional que a Terra exerce sobre

a bola. Suponha que o módulo da força gravitacional é 2,0 N. Nesse caso, o módulo

da força para cima deve ser 2,0 N e, portanto, o *peso P* da bola é 2,0 N. Também

dizemos que a bola *pesa* 2,0 N.

Uma bola com um peso de 3,0 N exigiria uma força maior (3,0 N) para permanecer em equihbrio. A razão é que a força gravitacional a ser equilibrada tem um módulo maior (3,0 N). Dizemos que esta segunda bola é *mais pesaa* que a primeira.

Vamos generalizar a situação. Considere um corpo que tem uma aceleração ã

nula em relação ao solo, considerado mais uma vez como referencial inercial. Duas

-

forças auam sobre o corpo: uma força gravitacional *F8*, dirigida para baixo, e uma força para cima, de módulo *P*, que a equilibra. Podemos escrever a segunda lei de

Newton para um eixo *y* vertical, com o sentido posiivo para cima, na forma

Em nossa situação, esta equação se tona

P - [illegible] = n1(0)

(5-10)

$$\vec{F}_{gE} = m_E\vec{g}$$

$$\vec{F}_{gD} = m_D\vec{g}$$

$$\vec{F}_g = m\vec{g}$$

$$P = F_g$$

ou

(peso. co,n o solo como referencial inercial).

(5-1 1)

De acordo com a Eq. 5-11 (supondo que o solo é um referencial inercial),

O peso *P* de um corpo é igual ao módulo *Fg* da força graviacional que age sobre o corpo.

Subsituindo *F8* por *mg*, obtemos a equação

P* = *mg

(peso),

(5-12)

Figua 5-5 Uma balança de braços

que relaciona o peso à massa do corpo.

iguais. Quando a balança está

***Pesar* um corpo signiica medir o peso do corpo. Uma forma de fazer isso é coequilibrada, a força gravitacional *Fge* locar o corpo em um dos pratos de uma balança de braços iguais (Fig. 5-5) e colocar**

a que está submetido o corpo que se

deseja pesar (no prato da esquerda) e a

corpos de referência (cujas massas sejam conhecidas) no ouro prato até que se esforça gravitacional toal tabeleça o equilíbrio, ou seja, até que as forças gravitacionais dos dois lados sejam

[illegible] a que estão**

submetidas as massas de referência

iguais. Como, nessa situação, as massas nos dois pratos são iguais, ficamos conhe

(no prato da direita) são i

cendo a massa do corpo. Se conhecemos o valor de *g* no local onde está situada a

uais. Assim,

a massa *me* do corpo que está sendo

balança, também podemos calcular o peso do corpo com o auxlio da Eq. 5-12.

pesado é igual à massa total mD das

Também podemos pesar um corpo em uma balança de mola (Fig. 5-6). O corpo

massas de referência.

distende uma mola, movendo um ponteiro ao longo de uma escala que foi calibrada e

marcada em unidades de massa ou de força (Quase todas as balanças de banheiro são

deste ipo.) Se a escala esiver em unidades de massa, fornecerá valores precisos apenas

nos lugares onde o valor de *g* for o mesmo da localidade onde a balança foi calibrada.

Para que o peso de um corpo seja medido corretamente, não deve possuir uma

aceleração *vertical.* Assim, por exemplo, se você se pesar no banheiro de casa ou a

bordo de um trem em movimento, o resulado será o mesmo. Caso, porém, repita a

medição em um elevador acelerado, obterá uma leitura diferente por causa da aceleração. Um peso medido desta forma é chamado de *peso aparente.*

***Atenção:* o peso de um corpo não é a mesma coisa que a massa. O peso é o módulo de uma força e está relacionado à massa aravés da Eq. 5-12.**

Se você mover um corpo para um local onde o valor de *g* é diferente, a massa do corpo (uma propriedade intrínseca) continuará a mesma, mas o peso mudará Por exemplo: o peso de uma bola de boliche de massa igual a 7,2 kg é 71 N na Terra, mas apenas 12 N

na Lua. Isso se deve ao fato de que, enquanto a massa é a mesma na Tera e na Lua,

a aceleração de queda livre na Lua é apenas 1,6 m/s2, muito menor, portanto, que a

aceleração de queda livre na Terra, que é da ordem de 9,8 m/s2

Escala calibrada

•

em unidades de

peso ou de massa

Fora Normal

Se você ica em pé em colchão, a Terra o puxa para baixo, mas você permanece em

repouso. Isso acontece porque o colchão se deforma sob o seu peso e empurra você

***I*)**

para cima. Da mesma forma, se você esá sobre um piso, ele se deforma (ainda que

imperceptivelmente) e o empurra para cima. Mesmo um piso de concreto aparentemente rígido faz o mesmo (se não esiver apoiado diretamente no solo, um número suicientemente grande de pessoas sobre o mesmo pode quebrá-lo).

Figua 5-6 Uma balança de mola. A

O empurrão exercido pelo colchão ou pelo piso é uma força normal *FN*. O nome

leitura é proporcional ao *peso* do objeto vem do termo matemáico *nomal,* que signiica perpendicular. A força que o piso colocado no prato e a escala fornece o

exerce sobre você é perpendicular ao piso.

valor do peso se estiver calibrada em

unidades de força. Se, em vez disso,

estiver calibrada em unidades de massa,

Quando um corpo exerce uma força sobre uma superície, a superfície (ainda que

a leitura será i

aparentemente rígida) se deforma e empura o corpo com uma força normal *FN* que é

ual ao peso do objeto

apenas se o valor de *g* no lugar onde a

perpendicular à superfície.

balança está sendo usada for igual ao

valor de *g* no lugar onde a balança foi

A Figura 5-7a mostra um exemplo. Um bloco de massa *m* pressiona uma mesa

calibrada.

para baixo, deformando-a por causa da força [illegible] a que o bloco esá sujei-

o diarama de corpo livre do bloco. As forças *F8* e *,*v são as únicas forças que atuam sobre o bloco e ambas são vericais. Assim, a segunda lei de Newton para o bloco, tomando um eixo *y* com o sentido positivo para cima (F ess = may), assume a forma F *N* - <[illegible] = nia. *1*,.

Substituindo Fg por *mg* (Eq. 5-8), obtemos

FN - n1g = ,na>,.

O módulo da força normal é, portanto,

FN = 1ng + 1nay = 1n(g + ay)

(5-13)

para qualquer aceleração verical ay da mesa e do bloco (que poderiam estar, por

exemplo, em um elevador acelerado). Se a mesa e o bloco não estão acelerados em

relação ao solo, ay = O e a Eq. 5-13 nos dá

,v = *nig*.

(5-14)

TESTE 3

Na Fig. 5-7, o módulo da força normal *FN* é maior, menor ou iual a mg se o bloco e a mesa estão em um elevador que se move para cima (a) com velocidade constante; (b) com

velocidade crescente?

Aito

Quando empurramos ou tentamos empurrar um corpo sobre uma superfície, a interação dos átomos do corpo com os átomos da superfície

faz com que haja uma resistência ao movimento. (Essa interação será discuida no próximo capítulo.) A

resistência é considerada como uma única força *J,* que recebe o nome de força de atrito ou simplesmente atrito. Essa força é paralela à superfície e aponta no senido oposto ao do movimento ou tendência ao movimento (Fig. 5-8). Em algumas siua

ções, para simplificar os cálculos, desprezamos as forças de arito.

Taão

Quando uma corda (ou um io, cabo ou ouro objeto do mesmo ipo) é presa a um

corpo e esicada, aplica ao corpo uma força f orientada ao longo da corda (Fig.

***5-9a).* Essa força é chamada de *força de tração* porque a corda está sendo raciona**

Direção do

--

da (puxada). A *tensão a cora* é o módulo *T* da força exercida sobre o corpo. As

1-1novi1nento

____

sim, por exemplo, se a força exrcida pela corda sobre o corpo tem um módulo T

, _____

7

–

=

50 N, a tensão da corda é 50 N.

Figua 5-8 Uma força de arito J se

Uma corda é rquentemente considerada *sem massa* (o que signiica que a massa opõe ao movimento de um corpo sobre da corda é desprezível em comparação com a massa do corpo ao qual está presa) e uma superfície.

Figua 5-9 *(a)* A corda esticada

está sob tensão. Se a massa da corda

é desprezível, a corda puxa o corpo e

-

a mão com una força f, mesmo que

T

passe por uma polia sem massa e sem

atrito, como em

-

***(b)* e (e).**

T

As forças nas duas extremidades

da corda são iguais em módulo.

(a)

(b)

(e)

***inextensível* (o que signiica que o comprimento da corda não muda quando é submeida a uma força de tração). Nessas circunstâncias, a corda existe apenas como uma ligação enre dois corpos: exerce sobre os dois corpos forças de mesmo módulo *T,* mesmo que os dois corpos e a corda estejam acelerando e mesmo que a corda passe por uma polia *sem massa e sem atrito* (Figs. *5-9b* e e), ou seja, uma polia cuja massa é desprezível em comparação com as massas dos corpos e cujo arito no eixo**

de rotação pode ser desprezado. Se a corda dá meia volta em tono da polia, como

na Fig. 5-9c, a força resulante da corda sobre a polia é *2T.*

-TESTE 4

O corpo suspenso da Fig. 5-9c pesa 75 N. A tensão *T* é igual, maior ou menor que 75 N

quando o corpo se move para cima (a) com velocidade consante, (b) com velocidade

crescente e (c) com velocidade decrescente?

5-8 A Terceira Lei de Neton

Dizemos que dois corpos *interagem* quando empurram ou puxam um ao outro, ou

seja, quando cada corpo exerce uma força sobre o ouro. Suponha, por exemplo, que

você apoie um livro *L* em uma caixa C (Fig. 5-1 *Oa)*. Nesse caso, o livro e a caixa interagem: a caixa exerce uma força horizonal *Fie* sobre o livro e o livro exerce uma força horizontal *'ei* sobre a caixa. Este par de forças é mostrado na Fig. 5-lOb. A

terceira lei de Newton airma o seguinte:

Caixa e

Terceira Lei de Newton Quando dois corpos interagem, as forças que cada corpo

exerce sobre o outro são iguais em módulo e têm sentidos opostos.

-

(a)

-

Fu;

cL

onde o sinal negativo significa que as duas forças têm senidos opostos. Podemos

***C* exerce sobre *L*.**

chamar as forças enre dois corpos que interagem de par de foras da terceira lei.

Figua 5-1 O *(a)* O livro *L* está apoiado Sempre que dois corpos interagem, um par de forças da terceira lei está presente. O

na caixa *C*. *(b)* As forças F

livro e a caixa da Fig. 5-1 *Oa* estão em repouso, mas a terceira lei seria válida mesmo Lc (força da

caixa sobre o livro) e '

que esivessem em movimento uniforme ou acelerado.

ci (força do livro

sobre a caixa) têm o mesmo módulo e

Como ouro exemplo, vamos examinar os pares de forças da terceira lei que

sentidos opostos.

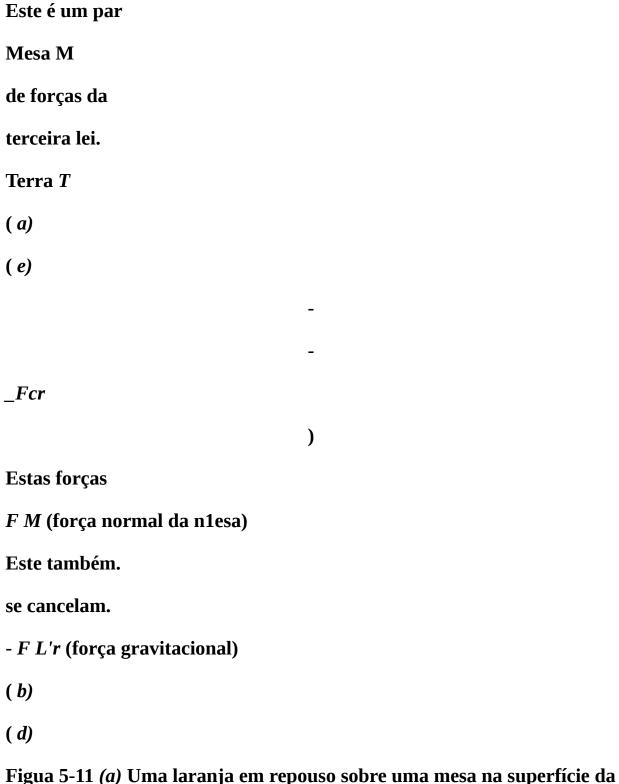
existem no sistema da Fig. 5-1 la, constituído por uma laranja, uma mesa e a Terra.

$\vec{F}_{LT} = -\vec{F}_{TL}$

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - 1

103

[illegible]

Laranja *L*

Figua 5-11 *(a)* Uma laranja em repouso sobre uma mesa na superfície da Terra. *(b)* As forças que agem *sobre a laranja* são *FL,* 1 e 'Lr· (e) Par de forças da terceira lei para a interação abóbora-Terra. (d) Par de forças da terceira lei para a interação abóbora-mesa.

A laranja interage com a mesa e esta com a Terra (desta vez, existem rês corpos

cujas interações devemos estudar).

Vamos inicialmente nos concentrar nas forças que agem sobre a laranja (Fig.

5-1 lb). A força FM é a força normal que a mesa exerce sobre a laranja e a força *'Lr*

é a força graviacional que a Terra exerce sobre a laranja. FM e *F:r* formam um par

de forças da terceira lei? Não, pois são forças que atuam sobre um mesmo corpo, a

laranja, e não sobre dois corpos que interagem.

Para enconrar um par da terceira lei, precisamos nos concenrar, não na laranja,

mas na interação enre a laranja e ouro corpo. Na interação laranja-Terra (Fig. 5-1 lc),

-

a Terra arai a laranja com uma força ravitacional *FLr* e a laranja arai a Terra com

uma força gravitacional F.l. Essas forças formam um par de forças da terceira lei?

Sim, porque as forças atuam sobre dois corpos que interagem e a força a que um está

submeido é causada pelo ouro. Assim, de acordo com a terceira lei de Newton,

(interação laranja-Terra)

Na interação laranja-mesa, a força da mesa sobre a laranja é FM e a força da

-

laranja sobre a mesa é *FML* (Fig. 5-ll). Essas forças também formam um par de

forças da terceira lei e, portanto,

-

-

FM = -,,l

(interação laranja-mesa)

TESTE 5

Suponha que a laranja e a mesa da Fig. 5-11 estão em um elevador que começa a acelerar

para cima. (a) Os módulos de *F,l* e *'.u* aumentam, diminuem ou permanecem os mesmos?

(b) Essas duas forças coninuam a ser iguais em módulo, com sentidos opostos? (c) Os

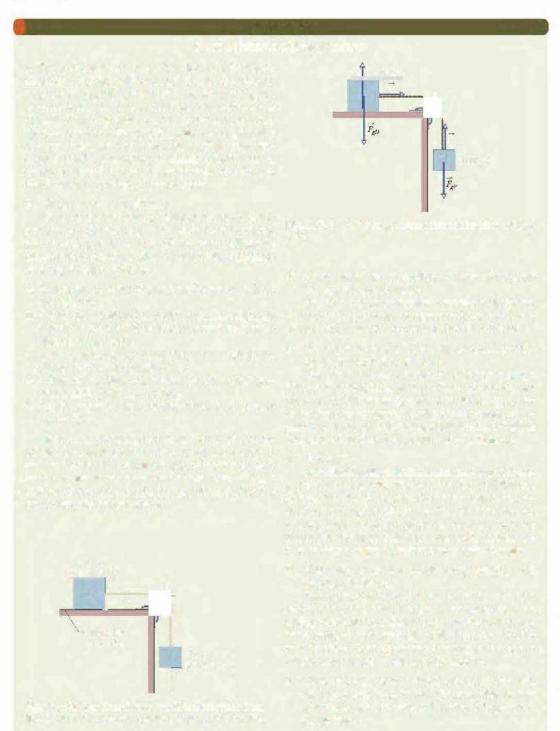
módulos de 'Lr e 'rL aumentam, diminuem, ou permanecem os mesmos? (d) Essas duas

forças continuam a ser iuais em módulo, com sentidos opostos?

5-9 Aplicando as Leis de Neton

O resto deste capítulo é composto por exemplos. O leitor deve examiná-los atentamente, observando os métodos usados para resolver cada

problema. Especialmente importante é saber raduzir uma dada situação em um diagrama de corpo livre com

eixos adequados, para que as leis de Newton possam ser aplicadas.

Exemplo

Bloco deslizante e bloco pendente

-

A Fig. 5-12 mostra um bloco *D* (o *bloco deslizante)* de

massa *M*

= 3,3 kg. O bloco está livre para se mover ao

longo de uma superfície horizontal sem aito e está ligado,

T

M

por uma corda que passa por uma polia sem atrito, a um

segundo bloco *P* (o *bloco pendente),* de massa *m* = 2,1

kg. As massas da corda e da polia podem ser desprezadas

em comparação com a massa dos blocos. Enquanto o blo

T

co pendente *P* desce, o bloco deslizante *D* acelera para a

m Bloco *P*

direita. Determine (a) a aceleração do bloco *D,* (b) a aceleração do bloco *P* e (c) a tensão na corda.

P *De que trata este problema?*

Foram dados dois corpos, o bloco deslizante e o bloco

pendente, mas ambém é preciso levar em conta a *Terra,* Figura 5-13 As foças que agem sobre os dois blocos da Fig.

que atua sobre os dois corpos. (Se não fosse a Terra, os 5-12.

blocos não se moveriam.) Como mosra a Fig. 5-13, cinco

forças agem sobre os blocos:

P *Como classificar esse problema? Ele sugere alguma*

1. A corda puxa o bloco *D* para a direita com uma força

lei da sica em particular?

de módulo *T.*

Sim. O fato de que as randezas envolvidas são forças,

2. A corda puxa o bloco *P* para cima com uma força cujo massas e acelerações sugere a segunda lei de Newton do momódulo também é *T.* Esta força para cima evita que o vimento, *Fs* = mã. Essa é a nossa ideia-chave inicial.

bloco caia livremente.

3. A Terra puxa o bloco *D* para baixo com uma força gra P *Se eu aplicar a segunda lei de Newton a esse proble*

vitacional g

ma, a que corpo devo aplicá-la?

***0*, cujo módulo é *Mg*.**

4. A Terra puxa o bloco *P* para baixo com uma força gra

Estamos lidando com o movimento de dois corpos, o

vitacional

bloco deslizante e o bloco endente. Embora se rate de *cor*

***F81,*, cujo módulo é *mg*.**

5. A mesa empurra o bloco *D* para cima com uma força *pos extensos* (não pontuais), podemos tratá-los como parínormal *F*

culas porque todas as partes de cada blco se movem exata

***N*.**

mente da mesma forma. Uma segunda ideia-chave é aplicar

Existe oura coisa digna de nota. Como estamos su a segunda lei de Newton separadamente a cada bloco.

pondo que a corda é inextensível, se o bloco *P* desce 1

mm em um certo intervalo de tempo, o bloco *D* se move 1 P *E a polia?*

mm para a direita no mesmo intervalo. Isso signiica que

A polia não pode ser ratada como uma partícula poros blocos se movem em conjunto e as acelerações dos dois que difeentes partes da polia se movem de modo diferente.

blocos têm o mesmo módulo *a*.

Quando discutirmos as rotações, examinaremos com detalhes o caso das polias. No momento, evitamos discuir o comporamento da polia supondo que sua massa pode ser

desprezada em comparação com as massas dos dois blocos;

a única unção da polia é mudar a orientação da corda.

Bloco

deslizante *D*

P *Está certo, mas como vou aplicar a equação Fs = mã*

ao bloco deslizante?

***M* 1—**

Represente o bloco *D* como uma parícula de massa

***M* e desenhe todas as forças que atuam *sobre* ele, como**

na Fig. 5-l 4a. Este é o diagrama de corpo livre do bloco.

Superície

Em seguida, desenhe um conjunto de eixos. O mais natu

se1n atrito

Bloco

ral é desenhar o eixo x paralelo à mesa, apontando para a

m

[illegible] pendente *P***

direita, no sentido do movimento do bloco *D*.

P *Obrigdo, mas você ainda não me disse como vou*

aplicar a equação* F s = mã *ao bloco deslizante; tudo

Figura 5-12 Um bloco *D* de massa *M* está conectado a um

que fez foi explicar como se desenta um diagrama de

bloco *P* de massa *m* por uma corda que passa por uma polia.

corpo livre.

3,3 kg + 2,1 kg '

es = Mã é uma equação vetorial e, portanto, equivale a

três equações algébricas, uma para cada componente:

= 13N.

(Resposta)

F

P *O problema agora está esolvido, certo?*

es.x = Max F,es,y = MyFes.z = Maz

(5-16)

onde F,e

Essa é uma pergunta razoável, mas o problema não

s,x, F .,,y e F,es. são as componentes da força resultante em relação aos rês eixos. Podemos aplicar cada uma pode ser considerado resolvido até que você examine os dessas equações à direção correspondente. Como o bloco resultados para ver se fazem sentido. (Se você obtivesse D não possui aceleração vertical, F .,

esses resultados no trabalho, não faria questão de conferi

,y = May se tona

los antes de enregá-los ao chefe?)

FN = F *8* v = OouFN = F *8* v

(5-17)

Examine primeiro a Eq. 5-21. Observe que está di

110.

(5-18)

Como essa equação contém duas incógnias, T e *a,* ainda Nessa forma, fica mais fácil ver que esta equação também não podemos resolvê-la. Lembre-se, porém, de que ainda esá dimensionalmente correta, já que tanto *T* quanto *mg* não dissemos nada a respeito do bloco pendente.

-

têm dimensões de força. A Eq. 5-23 também mosra que

a tensão na corda é sempre menor que *mg* e, portanto,

P *De acordo. Como vou aplicar a equação F*

s = ã *ao* é sempre menor que a força gravitacional a que está

bloco pendente?

submeido o bloco pendente. Isso é razoável; se *T* fosse

Do mesmo modo como aplicou ao bloco *D:* desenhe *maior* que *mg,* o bloco pendente soreria uma aceleração um diagrama de corpo livre para o bloco *P,* como na Fig. para cia.

5-14b. Em seguida, aplique a equação Fes = mã na forma

Podemos também veriicar se os resultados estão corde componentes. Desta vez, como a aceleração é ao lon retos estudando casos especiais para os quais sabemos de go do eixo *y,* use a parte *y* da Eq. 5-16 (Fes,y = may) para antemão qual é a resposta. Um caso simples é aquele em escrever

que *g* = O, como se o experimento fosse realizado no es

T-F

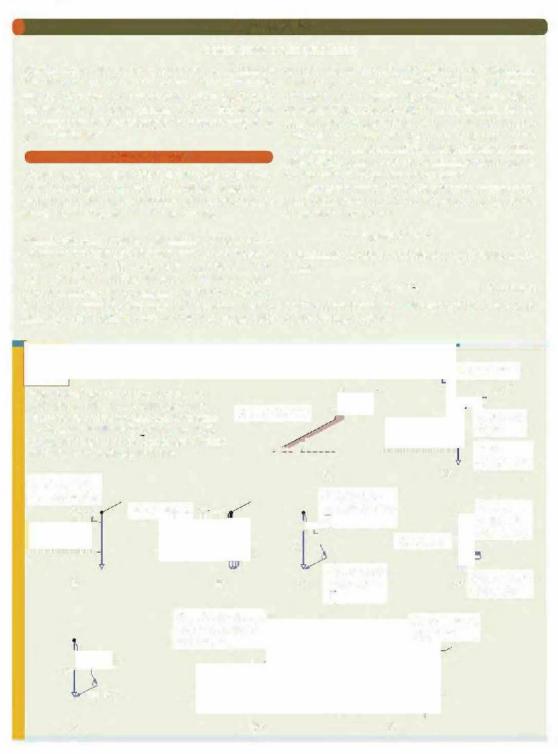
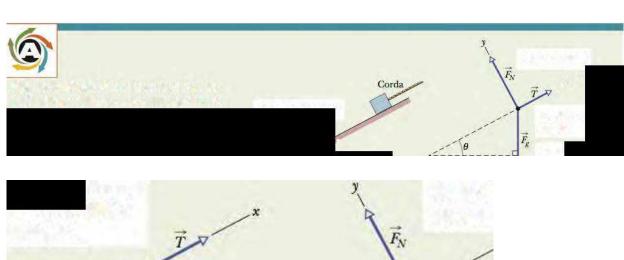
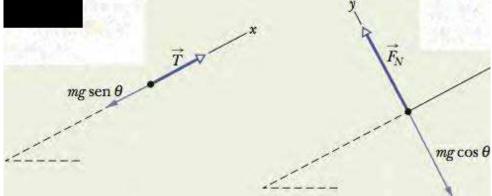
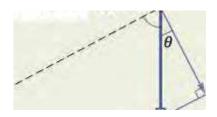
Corda
y
$\vec{F}_N$
$\vec{T}$
$\vec{F}_g$
θ

x
$\vec{T}$
mg sen θ
y
$\vec{F}_N$
$mg \cos \theta$

θ

θ

θ
$mg \cos \theta$

θ

Exemplo

Corda, bloco e plano inclinado

Na Fig. *5-15a,* uma corda puxa para cima uma caixa de dessa força paralela ao plano é diiida para baixo e tem um biscoitos ao longo de um plano inclinado sem atrito cujo módulo *mg* sen O, como mosra a Fig. 5-15g. (Para compre

ângulo *é }* = 30°. A massa da caixa é *m* = 5,00 kg e o ender por que essa função rigonomérica esá envolvida, módulo da força exercida pela corda é *T* = 25,0 N. Qual observe as Figs. 5-15c a 5-15h, nas quais são estabelecidas é a componente *a* da aceleração da caixa na direção do relações enre o ângulo dado e as componentes das forças.) plano inclinado?

Para indicar o sentido, escrevemos a componente como

-*mg* sen O. A força normal ,v é perpendicular ao plano

IDEIA-CHAVE

(Fig. 5-15i) e, poranto, não tem nenhuma inluência sobre

De acordo com a segunda lei de Newton (Eq. 5-1), a ace a aceleração da direção paralela ao plano.

leração na direção do plano inclinado depende apenas das

De acordo com a Fig. 5-15h, podemos escrever a se-

-

componentes das forças paralelas ao plano (não depende gunda lei de Newton (F._. = mã) para o movimento ao das componentes perpendiculares ao plano).

longo do eixo x na forma

1' - ,ng

álco* Por conveniência, desenhamos o sistema de cosen *e*= *,na.

(5-24)

ordenadas e o diagrama de corpo livre da Fig. *5-15b.* O Subsituindo os valores numéricos e explicitando *a*, obsenido positivo do eixo x é para cima, paralelamente ao

-

temos

plano. A força *T* exercida pela corda é dirigida para cima,

paralelamente ao plano, e tem um módulo *T* = 25,0 N. A

-

***a* = 0.100 m/s2,**

(Resposta)

força gravitacional *F* é verical, para baixo, e tem um mó-onde o resultado posiivo indica que a caixa se move para

8

dulo *mg* = (5,00 kg)(9,8 m/s2) = 49,0 N. A componente cima ao longo do plano.

Força normal

/X

Figua 5-15 (a) Uma caixa sobe um plano

inclinada, puxada por uma corda. (b) As três

forças que agem sobre a caixa: a força da corda

A caixa acelera.

Tensão da

f, a força gravitacional [illegible] e a força normal FN.

corda

(c)-(i) As componenes de F *8* na direção do plano

8

inclinado e na direção perpendicular.

Força

gravitacional

(a)

(b)

Este triângulo

é um retângulo.

F

(use sen8)

g

A resultante dessas

Estas forças se

forças determina a

cancelam.

aceleração.

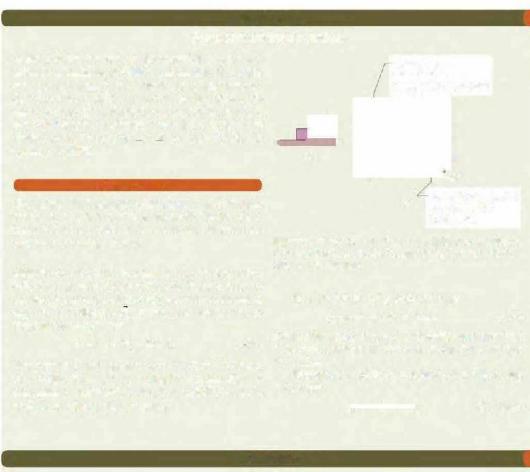
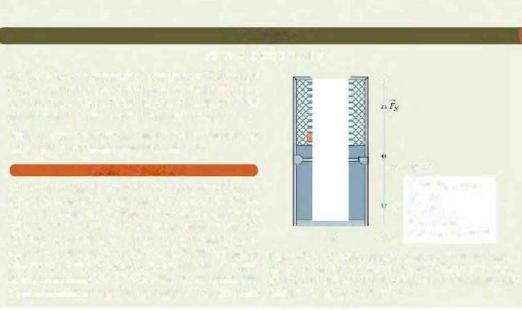
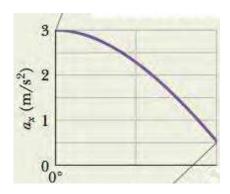
X

g

mgsen8

(g)

(h)

(i)

$a_x = -2{,}00 \text{ m/s}^2.$

Exemplo

Força com um ângulo variável

A Fig. *5-16a* mostra um arranjo no qual duas forças são

-

Quando F1 é

aplicadas a um bloco de 4,00 kg em um piso sem arito,

horizontal, a

mas apenas a força i está indicada. Essa força tem mó-

aceleração é 3,0 m/s2.

dulo ixo, mas o ângulo } com o semieixo *x* positivo pode

variar. A força , é horizontal e tem módulo constante. A

Fig. *5-16b* mostra a aceleração horizontal *ax* do bloco em

função de} no intervalo " < *}* < 90°. Qual é o valor de

a

1

***x* para O = 180°?**

(a)

90º

I D EIAS-CHAVE

e

-

(1) A aceleração horizontal *a*

Quando F1 é vertical,

***x* depende da força horizonal**

(b)

a aceleração é

resultante F,es.x• dada pela segunda lei de Newton. (2) A

0,50 m/s2.

força horizontal resultante é a soma das componentes

horizontais das forças i e *F2*

Figura 5-16 *(a)* Uma das duas forças aplicadas a um bloco.

•

O ângulo *8* pode variar. *(b)* Componente ax da aceleração do

bloco em função de *8.*

álculos* Como a força , é horizontal, a componente *x

é F2• A componente *x* de i é F1 cos O. Usando essas expressões e uma massa *m* de 4,00 kg, podemos escrever a Fazendo } = 0° na Eq. 5-25, obtemos:

segunda lei de Newton (',., = mã) para o movimento ao

longo do eixo *x* na forma

F1 cos Oº + 2,00 = 4,00ax.

(5-26)

De acordo com o gráfico, a aceleração correspondente

F1 cos 8 + F *2* = 4,00ax.

(5-25) é 3,0 /s2• Substituindo este valor na Eq. 5-26, obtemos

Essa equação mosra que para } = 900, F

F

***1* cos } é zero e**

1 = l O N.

F

Fazendo F

2 = *4,00ax*. De acordo com o gráfico, a aceleração cor

1 = 10 N, F2 = 2,00 N *e }* = 180° na Eq.

respondente é 0,50 /s2

5-25, temos:

• Assim, F2 = 2,00 N e o senido

de , é o senido positivo do eixo *x*.

(Resposta)

Exemplo

Forças em um elevador

Na Fig. 5-17a, um passageiro de massa *m* = 72,2 kg esá

y

de pé em uma balança no interior de um elevador. Estamos

interessados na leitura da balança quando o elevador esá parado e quando esá se movendo para cima e para baixo.

(a) Escreva uma equação que expresse a leitura da balança em função da aceleração vertical do elevador.

•

IDEIAS-CHAVE

-

_ Passageiro

(1) A leiura é igual ao módulo da força normal F

Estas forças se

N que a

balança exerce sobre o passageiro. Como mosra o dia

_ opõem.

grama de corpo livre da Fig. 5-17b, a única outra força

***Fg* A resultante**

que age sobre o passageiro é a força gravitacional *g*.

produz uma

(b) Podemos relacionar as forças que agem sobre o pas

(a)

aceleração vertical.

(b)

sageiro à aceleração *ã* usando a segunda lei de Newton Figura 5-17 *(a)* Um passageiro de pé em uma balança que *(, •• = ã)*. Lembre-se, porém, de que esta lei só se apli indica ou o peso ou o peso aparente. *(b)* O diagrama de corpo ca aos referenciais inerciais. Um elevador acelerado *não* livre do passageiro, mosrando a força normal *FN* exercida pela

***é* um referencial inercial. Assim, escolhemos o solo como balança e a força gravitacional [illegible]

referencial e analisamos todos os movimentos em relação *Cálculos* Para *a* = 3,20 m/s2, a Eq. 5-28 nos dá a este referencial.

FN = (72,2 kg)(9,8 m/s2 + 3,20 m/s2)

***álculos* Como as duas forças e a aceleração a que o pas**

= 939 N,

(Resposta)

sageiro está sujeito são vericais, na direção do eixo y da e para *a* = -3,20 m/s2, temos Fig. 5-17b, podemos usar a segunda lei de Newton para

F

as componentes y (es,y

; = (72,2 kg)(9,8 m/s2 - 3,20 m/s2)

= may) e escrever

= 477 N.

(R.cspos1a)

FN* - *F* 1 = *,na

Se a aceleração é para cima (ou seja, se a velocidade de subiou

FN = *FI* + *,na.*

(5-27) da do elevador esá aumentando ou se a velocidade de descida

Isso signiica que a leitura da balança, que é igual a *F* esá diminuindo), a leitura da balança é maior que o peso do *N*•

depende da aceleração vertical. Subsituindo F

passageiro. Essa leiura é uma medida do peso aparente, ois

g por *mg,*

obtemos

é realizada em um referencial não inercial. Se a aceleração é

para baixo (ou seja, se a velocidade de subida do elevador está

***F* N = 111(g + a) (l{espusta)**

(5-28) diinuindo ou a velocidade de descida esá aumentando), a

para qualquer valor da aceleração *a.*

leiura da balança é menor que o peso do passageiro.

(b) Qual é a leitura da balança se o elevador está parado (d) Durante a aceleração para cima do item (c), qual é o ou está se movendo para cima com uma velocidade cons módulo *F* e, da força resultante a que está submetido o tante de 0,50 m/s?

passageiro e qual é o módulo ap.et da aceleração do passageiro no referencial do elevador? A equação F s = mãp,et IDEIA-CHAVE

é obedecida?

Para qualquer velocidade constante (zero ou diferente de

zero), a aceleração do passageiro é zro.

***álculo* O módulo *F8* da força gravitacional a que está submeido o passageiro não depende da aceleração; assim, de**

***culo* Subsituindo esse e outros valores conhecidos na acordo com o item (b), *F8* = 708 N. De acordo com o item Eq. 5-28, obtemos**

(c), o módulo *FN* da força normal a que está submeido o

passageiro durante a aceleração para cima é o valor de 939

FN = (72,2 kg)(9,8 m/s2 + 0) = 708 N.

N indicado pela balança. Assim, a força resultante a que o

(Resposta) passageiro está submetido é

Esse é o peso do passageiro e é igual o módulo *F8* da força F

gravitacional a que esá submetido.

res = *F N* - [illegible] = 939 N - 708 N = 231 N, (Resposta)

durante a aceleração para cima. Entretanto, a aceleração do

(c) Qual é a leitura da balança se o elevador sore uma passageiro em relação ao elevador, ap,et, é zero. Assim, no aceleração para cima de 3,20 m/s2? Qual é a leitura se o referencial não inercial do elevador acelerado, *F* ., não é elevador sofre uma aceleração para baixo de 3,20 m/s2? igual a map,el e a segunda lei de Newton não é obedecida.

Exemplo

Aceleração de um bloco empurado por outro bloco

-

Na Fig. 5-18a, uma força horizontal constante ,

Esse raciocínio está errado porque

p de mó-

.P não é a única força

dulo 20 N é aplicada a um bloco *A* de massa mA = 4,0 kg, horizontal a que o bloco *A* esá sujeito; existe também a

-

que empurra um bloco *B* de massa *m8* = 6,0 kg. O bloco força FA *8* exercida pelo bloco *B* (Fig. 5-18b).

desliza sobre uma superície sem arito ao longo de um

exo *x*.

***Solução Frustrada* Vamos incluir a força *FA8,* escrevendo,**

(a) Qual é a aceleração dos blocos?

novamente para o eixo *x*,

Fap - *FAJ = ni,a.*

***E-o Grave* Como a força .P é aplicada diretamente ao**

bloco *A,* usamos a segunda lei de Newton para relacionar (Usamos o sinal negaivo para indicar o senido de *FA8.)*

-

essa força à aceleração

Como

***ã* do bloco**

F

***A.* Como o movimento**

***AB* é uma segunda incógnita, não podemos resolver**

é ao longo do eixo *x,* usamos a lei para as componentes *x* esa equação para determinar o valor de *a.*

(F,e,,x = max), escrevendo

Soução Correa Por causa do sentido de plicação da for-

-

[illegible] = rnAa.**

ça ,p, os dois blocos se movem como se fossem um só.

***a* = - - - -**

20N

- - - - -

-

= 2,0 m/s2.

4,0 kg + 6,0 kg

Estas são as duas forças

(Resposta)

que agem sobre o bloco *A*.

A resultante produz a

Assim, a aceleração do sistema (e de cada bloco) é no sen

(b)

aceleração do bloco A.

ido positivo do eixo x e tem um módulo de 2,0 m/s2•

(b) Qual é a força (horizontal) F

A* exercida pelo bloco *A

B

-

sobre o bloco *B* (Fig. 5-18c)?

Esta é a única força

- [illegible]

[illegible]

-*x*

responsável pela

aceleração do bloco *B.*

IDEIA-CHAVE

(e)

Figura 5-18 (a) Uma força horizontal constante '

Podemos usar a segunda lei de Newton para relacionar a

av é

aplicada ao bloco *A,* que empurra o bloco *B.* (b) Duas forças

força exercida sobre o bloco *B* à aceleração do bloco.

horizontais agem sobre o bloco *A.* (c) Aenas uma força

horizontal age sobre o bloco *B.*

***Cálculo* Nesse caso, considerando apenas o eixo *x*, podemos escrever:**
Podemos usar a segunda lei de Newton para relacionar a

$F1A$ = m u^a,

força aplicada *ao conjunto dos dois blocos* à aceleração *do* que,
subsituindo os valores conhecidos, nos dá *conjunto dos dois blocos*
aravés da segunda lei de Newton.

$F11$ = (6,0 kg)(2,0 m/s2) = 12 N.

Assim, considerando apenas o eixo *x*, podemos escrever:

-

(Resposta)

Assim, a força *A* é orientada no senido positivo do eixo

Fap = (m1 + mu)a,

***x* e tem um módulo de 12 N.**

1

REVISÃO E RESUMO

Mecânica newtoniana Para que a velocidade de um objeto Segunda Lei de Newton A força resultante *F* s que age sobre varie (ou seja, para que o objeto sofra uma aceleração), é preciso um corpo de massa *m* está relacionada à aceleração ã do corpo que ele seja submeido a uma força (empurrão ou puxão) exercida aravés da equação

por outro objeto. A *mecânica newtoniana* descreve a relação entre

acelerações e forças.

.e., = ,na,

(5-1)

que pode ser escrita em termos das componentes:

Força A força é uma grandeza vetorial cujo módulo é deinido

e

F, .. ,

- _ = *mn_*.

(5-2)

em termos da aceleração que imprimiria a uma massa de um qui

. .,

[illegible]

lorama. Por deição, uma força que produz uma aceleração de De acordo com a segunda lei, em unidades do SI, 1 m/s2 em uma massa de 1 kg tem um módulo de 1 newton (1 N).

1 N = l kg· n1/s2.

(5-3)

Uma força tem a mesma orientação que a aceleração produzida

O diarama de corpo livre é um diagrama simplificado no qual

ela força. Duas ou mais forças podem ser combinadas segunda as

regras da álgebra vetorial. A força resultante é a soma de todas as apenas *wn corpo* é considerado. Esse corpo é representado por um forças que agem sobre um corpo.

ponto ou por um desenho. As forças extenas que agem sobre o corpo

são representadas por vetores e um sistema de coordenadas é suer

Primeira Lei de Newton Quando a força resultante que age posto ao desenho, orientado de modo a simpliicar a solução.

sobre um corpo é nula, o corpo permanece em repouso ou se move

em linha reta com velocidade escalar constante.

Algumas Forças Especiais A força gravitacional FK exercida

sobre um corpo é um tipo especial de atração que um segundo corpo

Referenciais Inerciais Os referenciais para os quais as leis de exerce sobre o primeiro. Na maioria ds situações apresentadas neste Neton são válidas são chamados de *referenciais inerciais.* Os re livro, o segundo corpo é a Terra ou outro astro. No caso da Terra, a ferenciais para os quais as leis de Newton não são válidas são cha força é orientada para baixo, em dição ao solo, que é considerado mados de *referenciais não inerciais.*

um referencial inercial. O módulo de [illegible] é

Massa A massa de um corpo é a propriedade que relaciona a

[illegible] = *rng,***

(5-8)

aceleração do corpo à força responsável pela aceleração . A massa onde *m* é a massa do corpo e *g* é o módulo da aceleração em que

é uma randeza escalar.

da livre.

(2) $\vec{F}_1$

$\vec{F}_2$

$\vec{F}_1$ $\vec{F}_3$

O peso *P* de um corpo é o módulo da força para cima necessária

Quando uma corda está sob tensão, cada exremidade da corpara equilibrar a força gravitacional a que o corpo está sujeito. O da exerce uma força sobre um corpo. A força é orientada ao longo peso de um corpo está relacionado à massa através da equação

da corda, para longe do ponto onde a corda esá presa ao corpo. No

caso de uma *corda sem massa* (uma corda de massa desprezível),

p = *m.*

(5-12) as tensões nas duas exremidades da corda têm o mesmo módulo *T,*

A força normal FN é a força exercida sobre um corpo pela mesmo que a corda passe por uma *polia sem massa e sem atrito* (uma superfície na qual o corpo está apoiado. A força normal é sempre polia de massa desprezível cujo eixo tem um arito desprezível).

perpendicular à superfície.

A força de atito J é a força exercida sobre um corpo quando o Terceira Lei de Newton Se um corpo *C* aplica a um corpo *B*

corpo desliza ou tenta deslizar sobre uma superície. A força é sem uma força Fac, o corpo B aplica ao corpo C uma força 'c *8* tal que pre paralela à superfície e em o sentido oposto ao do deslizamento.

- -

Em uma *supeície ideal,* a força de arito é desprezível.

,*J<;* = -Fcn·

P E R G U N T A S

1 A Fig. 5-19 mostra diagramas de corpo livre de quaro situa

ções nas quais um objeto, visto de cima, é puxado por várias forças

em um piso sem atrito. Em quais dessas situações a aceleração *ã*

do objeto possui (a) uma componente x e (b) uma componente y?

(c) Em cada situação, indique a orientação de *ã* citando um quadrante ou um semieixo. (Isto pode ser feito com alguns cálculos mentais.)

y

y

7N

6 N

Figura 5-20 Pergunta 2.

3 N

a caixa deslizando com velocidade constante, devemos aumentar,

2 N

3 N

-<[illegible] . [illegible] x

diminuir ou manter inalterado o módulo de *i*?

2 N

5N

3 N

3? (b) Para que unção F tem o sentido conário ao do movimento

4 N

4N

inicial da pedra?

5 N

5 A Fig. 5 -22 mosra vistas superiores de quatro situações nas quais

(3)

(4)

forças auam sobre um bloco que está em um piso sem arito. Em

Figura 5-19 Pergunta 1.

que situações é possível, para certos valores dos módulos das forças,

que o bloco esteja (a) em repouso e b) se movendo com velocidade

consante?

2 Duas forças horizontais,

-

.

-

-

[illegible]

.

F = (3N)i - (4N)j e *F1* - -(1 N)i - {2 N)j

1

puxam um banana split no balcão sem arito de uma lanchonete.

Determine, sem usar uma calculadora, quais dos vetores do diagra

(1)

ma de corpo livre da Fig. 5-20 representam melhor (a) *i* e (b) *i.*

Qual é a componente da força resultante (c) ao longo do eixox e (d)

ao longo do eixo *y?* Para que quadrante aponta o vetor (e) da força

resultante e () da aceleração do sorvete?

3 Na Fig. 5-21, as forças *i* e *F*

(3)

(4)

***2* são aplicadas a uma caixa que**

desliza com velocidade constante sobre uma superfície sem arito.

Diminuímos o ângulo O sem mudar o módulo de *i.* Para manter Figura 5-22 Pergunta 5.

20 N

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENT0 - 1

1 1 1

6 A Fig. 5-23 mosra uma caixa em quatro situações nas quais forv,

***v*,**

ças horizontais são aplicadas. Ordene as situações de acordo com o

módulo da aceleração da caixa, começando pelo maior.

3 N

6N

58N

60N

-

-

- t

-

-

- t

l o >

l o >

i

i

i

(a)

(b)

13 N

15 N

43N

25N

(a)

(b)

(e)

l o >

l

i

4>

(e)

(d)

Figua 5-23 Pergunta 6.

7

Kansas City, 17 de julho de 1981: o hotel HyattRegency,

recém-inaugurado, recebe centenas de pessoas, que escuam e dan

çam sucessos da década de 1940 ao som de uma banda. Muitos se

aglomeram nas passarelas que se estendem como pontes por cima

(d)

(e)

(/)

do grande saguão. De repente, duas passarelas cedem, caindo sobre

a multidão.

Figura 5-25 Pergunta 8.

As passarelas eram sustentadas por hastes verticais e manids no

lugar por porcas atarraxadas nas hastes . No projeto original, seriam

usadas apenas duas hastes compridas, presas no teto, que sustenta

Corda

Corda

Corda

1

2

3

-

riam as três passarelas (Fig. 5-24a). Se cada passarela e as pessoas

F

110 kg 1i - ti 3 kg 1-i - ti 5 kg 1-

i>

que se enconram sobre ela têm uma massa total *M*, qual é a massa

i - ti 2 kg [illegible]

toal sustentada por duas porcas que esão (a) na passarela de baixo

e (b) na passarela de cima?

Figura 5-26 Pergunta 9.

Como não é possível ataraxar uma porca em uma haste a não ser

nas extremidades, o projeto foi modificado. Em vez de duas hastes,
bloco 3? (d) Ordene os blocos de acordo com o módulo da acel e foram
usadas seis, duas presas ao teto e quaro ligando as passarelas ração,
começando pelo maior. (e) Ordene as forças *F*, F21 e F32 de duas a duas
(Fig. 5-24b). Qual é agora a massa total sustentada por acordo com o
módulo, começando pelo maior.

duas porcas que estão (c) na passarela de baixo, (d) no lado de cima

da passarela de cima e (e) no lado de baixo da passarela de cima? Foi

•

•

N que o piso exerce sobre o bloco quando o módulo de F

aumenta a partir de zero, se a força F aponta (a) para baixo e (b)

(a)

(b)

para cima?

Figura 5-24 Pergunta 7.

12 A Fig. 5-28 mostra quaro opções para a orientação de uma

força de módulo *F* a ser aplicada a um bloco que se encontra so8 A Fig. 5-25 mosa três gráficos da componente de uma velocibre um plano inclinado. A força pode ser horizontal ou vertical.

dade *vx(t)* e rês gráficos da componente *vy(t).* Os ráficos não estão (No caso da opção *b,* a força não em escala. Que gráfico de

é suiciente para levantar o blovx(t) e que ráfico de *v>,(t)* correspondem co, afastando-o da superfície.) Ordene as opções de acordo com melhor a cada uma das situações da Pergunta 1 (Fig. 5-19)?

o módulo da força normal exercida pelo plano sobre o bloco, co9 A Fig. 5-26 mostra um conjunto de quaro blocos sendo puxados meçando pela maior.

por uma força *F* em um piso sem atrito. Que massa total é acelerada

para a direita (a) pela força F, (b) pela corda 3 e (c) pela corda 1?

b

(d) Ordene os blocos de acordo com a aceleração, começando pela

maior. (e) Ordene as cordas de acordo com a tensão, começando

a

pela maior.

e

1 O A Fig. 5-27 mostra rês blocos sendo empurrados sobre um piso

sem arito por uma força horizontal F. Que massa total é acelerada

30º *d*

para a direita (a) pela força F, (b) pela força *i,* exercida pelo bloco

1 sobre o bloco 2 e (c) pela força F32 exercida pelo bloco 2 sobre o
Figura 5-28 Pergunta 12.

F_1
θ_1
x
$\vec{F}_2$
θ_3
Alexandre
Carlos

0
−2
−4

CAPÍTULO 5

P R O B L E M A S

1

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adici onais disponíveis em O *Cico Voador da Ffsi.* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 5-6 A Segunda Lei de Newton

• •7 Duas forças agem sobre a caixa de 2,00 kg vista de cima na

•1 Apenas duas forças horizontais atuam em um corpo de 3,0 kg Fig. 5-31, mas apenas uma é mostrada. Para *F*1 = 20,0 N, *a* = 12,0

que pode se mover em um piso sem atrito. Uma força é de 9,0 N e m/s2 e *8* = 30,0º, determine a segunda força (a) em ermos dos v e aponta para o leste; a outra é de 8,0 N e atua 62º ao norte do oeste. tores unitários e como um (b) módulo e (c) um ângulo em relação Qual é o módulo da aceleração do corpo?

ao semieixo *x* positivo.

•2 Duas forças horizontais agem sobre um bloco de madeira de

2,0 kg que pode deslizar sem arito em uma bancada de cozinha, si-

y

-

A

A

tuada em um plano *y.* Uma das forças é , = (3,0 N)i + (4,0 N)j.

Determine a aceleração do bloco em termos dos vetores unitá-

-

A

A

-

rios se a outra força é (a) ***F***

- !-

----:-- X

2 **= (- 3,0 N)i +(- 4,0 N)j, (b)** ***F2*** **=**

(-3,0 N)i +(4,0 N)} e (c) F ***2*** **= (3,0 N)i +(- 4,0 N)}.**

e

-

•3 Se um corpo padrão de 1 kg tem uma aceleração de 2,00 m/s2

a

a 20,0º com o semieixo ***x*** **positivo, quais são (a) a componente** ***x*** **e (b) a componente** ***y*** **da força resultante a que o corpo está submeido Figura 5-31 Problema 7.**

e (c) qual é a força resultante em termos dos vetores unitários?

• •4 Sob a ação de duas forças, uma partícula se move com ve- ••8 Um objeto de 2,00 kg está sujeito a três forças, que lhe A

A

-

locidade constante i = (3 m/s)i -(4 m/s)j. Uma das forças é F, =

A

A

imprimem uma aceleração *ã* = - (8,00 m/s2)i +(6,00 m/s2)j. Se

A

A

(2 N)i + (-6 N)j. Qual é a oura?

-

A

A

-

A

duas das forças são , = (30,0 N)i + (16,0 N)j e *F2* = -(12,0 N)i +

• •5 Três astronautas, impulsionados por mochilas a jato, empur

A

(8, 00 N) j, determine a terceira.

ram e guiam um asteroide de 120 kg para uma base de manutenção, • •9 Uma parícula de 0,340 kg se move no plano *xy* de acordo exercendo as forças mosradas na Fig. 5-29, com *F1* = 32 N, *F2* = com as equações *x(t)* = -15,00 + 2,00t - *4,00t3* e *y(t)* = 25,00 +

55 N, *F3* = 41 N, *81* = 30º e *83* = 60º. Determine a aceleração do 7,00t - 9,00t2, com *x* e *y* em metros e *t em* segundos. No instanasteroide (a) em termos dos vetores uniários e como (b) um módulo te *t* = 0,700 s, quais

são (a) o módulo e (b) o ângulo (em relação e (c) um ângulo em relação ao semieixo *x* positivo.

ao semieixo *x* positivo) da força resultante a que está submetida a

partícula e (c) qual é o ângulo da direção de movimento da partíy

cula?

••10 Uma partícula de 0,150 kg se move ao longo de um eixo *x*

de acordo com a equação *x(t)* = -13,00 + 2,00t + *4,0t2* - 3,00t3, com *x* em metros e *t* em segundos. Qual é, na notação dos vetores unitários, a força que age sobre a partícula no instante *t* = 3,40 s?

• • 1 1 Uma partícula de 2,0 kg se move ao longo de um eixo *x* sob

a ação de uma força variável. A posição da partícula é dada por

Figura 5-29 Problema 5.

Fg

x* = 3,0 m + (4,0 *mls)t* + *ct2* - (2,0 m/s3)t3, comxemmeros e *tem

segundos. O fator *e* é constante. No instante *t* = 3,0 s, a força que

• •6 Em um cabo-de-guerra bidimensional, Alexandre, Bárbara e age sobre a partícula tem um módulo de 36 N e aponta no sentido Carlos puxam horizontalmente um pneu de automóvel nas orienta negaivo do eixo *x.* Qual é o valor de e?

ções mostradas na visa superior da Fig. 5-30. Apesar dos esforços •••12 Duas forças horizontais i e F *2* agem sobre um disco de 4,0

da rinca, o pneu permanece no mesmo lugar. Alexandre puxa com kg que desliza sem arito sobre o gelo, no qual foi desenhado um uma força ,, de módulo 220 N e Carlos puxa [illegible] uma força *Fc* de sistema de coordenadas *y.* A força i aponta no sentido positivo do módulo 170 N.

Observe que a orientação de Fc não é dada. Qual é eixoxe tem um módulo de 7,0N. A força F *2* tem um módulo de 9,0

o módulo da força F *8* exercida por Bárbara?

N. A Fig. 5-32 mostra a componente vx da velocidade do disco em

função do tempo *t.* Qual é o ângulo entre as orienações constantes

**das forças i e [illegible]

vx (m/s)

4

+

2

- - -

-+--+--l *t* (s)

-- -

·2

3

137º

Bárbara

Figura 5-30 Problema 6.

Figura 5-32 Problema 12.

T_1
T_2

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - 1

113

Seção 5-7 Algumas Forças Especiais

lo) = 40º. As seis pernas do inseto estão sob a mesma tensão e as

•13 A Fig. 5-33 mostra um arranjo no qual quaro discos estão seções das penas mais próximas do corpo são horizontais. (a) Qual suspensos por cordas. A corda mais comprida, no alto, passa por é a razão entre a tensão em cada tíbia (extremidade da pena) e o uma polia sem atrito e exerce uma força de 98 N sobre a parede à peso do inseto? b) Se o inseto estica um pouco as pernas, a tensão qual está presa. As tensões nas cordas mais curtas são T = 58,8 N, nas tIbias aumenta, diminui ou coninua a mesma?

1

$T2$ = 49,0 N e $T3$ = 9,8 N. Quais são as massas (a) do disco *A,* (b) do disco *B,* (c) do disco C e (d) do disco *D?*

Ariculação

[illegible]

Figura 5-35 Problema 16.

A

Seção 5-9 Aplicando as Leis de Neton

B

•17 Na Fig. 5-36, a massa do bloco é 8,5 kg e o ângulo) é 30º.

Determine (a) a tensão na corda e (b) a força normal que age sobre

e

o bloco. (c) Determine o módulo da aceleração do bloco se a corda

Tg

for cortada.

D

Figura 5-33 Problema 13.

•14 Um bloco com um peso de 3,0 N está em repouso em uma

superfície horizontal. Uma força para cima de 1,0 N é aplicada ao

corpo aravés de uma mola verical. Quais são (a) o módulo e (b)

o sentido da força exercida pelo bloco sobre a superfície horizontal?

•15 (a) Um salame de 11,0 kg esá pendurado por uma corda em Figura 5-36 Problema 17.

uma balança de mola, que esá presa ao teto por outra corda Fig.

5 -34a). Qual é a leitura da balança, cuja escala esá em unidades •18 [illegible] Em abril de 1974, o belga John Massis conseguiu pude peso? b) Na Fig. 5-34b o salame está suspenso por uma corda xar dois vagões de passageiros mordendo um freio preso por uma que passa por uma roldana e está presa a uma balança de mola. A corda aos vagões e se inclinando para trás com as pernas apoiadas exremidade oposta da balança esá presa a uma parede por outra nos dormentes da ferrovia. Os vagões pesavam 700 kN (cerca de corda. Qual é a leiura da balança? (c) Na Fig. 5-34c a parede foi 80 toneladas). Suponha que Massis tenha puxado com uma força substituída por um segundo salame de 11,0 kg e o sistema está em consante de módulo 2,5 vezes maior que seu peso e ângulo) de repouso. Qual é a leitura da balança?

30° com a horizonal. Sua massa era 80 kg e ele fez os vagões se

deslocarem de 1,0 m. Desprezando as forças de arito, determine a

Balança de mola

velocidade dos vagões quando Massis parou de puxar.

• 19 Qual é o módulo da força necessária para acelerar um renófoguete de 500 kg até 1600 km/h em 1,8 s, partindo do repouso?

•20 Um carro a 53 km/h se choca com um pilar de uma ponte. Um

Balança

passageiro do carro se desloca para a rente de uma distância de 65

de mola

cm (em relção à estrada) até ser imobilizado por um *airbag* inlado. Qual é o módulo da força (suposta constante) que atua sobre o tronco do

passageiro, que tem uma massa de 41 kg?

(b)

•21 Uma força horizontal constante , empurra um pacote dos

correios de 2,00 kg sobre um piso sem atrito onde um sistema de

Balança de mola

coordenadas *y* foi desenhado. A Fig. 5-37 mostra as componentes

***x* e *y* da velocidade do pacote em função do tempo *t.* Quais são (a) o módulo e (b) a orientação de ,? Ver Fig. 5-37, adiante.**

•22 - Um homem está sentado em um brinquedo de parque

de diversões no qual uma cabina é acelerada para baixo, no sentido

(a)

negaivo do eixo *y,* com uma aceleração cujo módulo é 1,4g, com

***g* = 9,80 /s2• Uma moeda de 0,567 g repousa no joelho do homem.**

Depois que a cabina começa a se mover e em termos dos vetores

(e)

unitários, qual é a aceleração da moeda (a) em relação ao solo e (b)

Figura 5-34 Problema 15.

em relação ao homem? (c) Quanto tempo a moeda leva para chegar

ao teto da cabina, 2,20 m acima do joelho? Em termos dos vetores

• • 16 Alguns insetos podem se deslocar pendurados em avetos. unitários, qual é (d) a força a que esá submetida a moeda e (e) a Suponha que um desses insetos tenha massa *m* e esteja pendurado força

aparente a que esá submetida a moeda do ponto de visa do em um raveto horizontal, como mosra a Fig. 5-35, com um ângu-homem?

v (m/s)

• 27 Um eléron com uma velocidade de 1,2 X 107 /s penetra ho

X

'

rizontalmente em uma região onde está sujeito a uma força vertical

10

,

consante de 4,5 X 10·16 N. A massa do elétron é 9,11 X 10·31 kg.

'

,

,

,

Determine a delexão verical sofrida pelo elétron enquanto percorre

,

uma disância horizonal de 30 mm.

5

, ,

•28 Um carro que pesa 1,30 X 104 N está se movendo a 40 k/h

, 1

quando os reios são aplicados, fazendo o carro parar depois de per

,

correr 15 m. Supondo que a força aplicada pelo reio é constante,

determine (a) o módulo da força e (b) o tempo necessário para o

o

1

2

3 t (s)

carro parar. Se a velocidade inicial é muliplicada por dois e o carro

experimenta a mesma força durante a frenagem, por que atores são

***vy* (m/s)**

.

multiplicados (c) a distância até o carro parar e (d) o tempo neceso ' '

sário para o carro parar? (Isto poderia ser uma lição sobre o perigo

o

t (s)

.

de dirigir em altas velocidades.)

'

-

•29 Um bombeiro que pesa 712 N escorrega por um poste vertical

:

- 5

' --

com uma aceleração de 3,00 /s2, dirigida para baixo . Quais são (a)

o módulo e (b) o sentido (para cima ou para baixo) da força vertical

exercida pelo poste sobre o bombeiro e (c) o módulo e (d) o sentido

10

•-

-

-

da força vertical exercida pelo bombeiro sobre o poste?

[illegible]

' '

•30 _ Os ventos violentos de um tornado podem fazer com

Figura 5-37 Problema 21.

que pequenos objetos iquem encravados em árvores, paredes de

ediícios e até mesmo em placas de sinalização de metal. Em uma

simulação em laboratório, um palito comum de madeira foi dispa

•23 Tarzan, que pesa 820 N, sala de um rochedo na pona de um rado por um canhão pneumático contra um galho de carvalho. A cipó de 20,0 m que está preso ao galho de uma árvore e faz inicial massa do palito era 0,13 g, a velocidade antes de penerar no galho mente um ângulo de 22,0º com a vertical. Suponha que um eixo *x* é era 220 /s e a profundidade de penetração foi 15 mm. Se o paliaçado horizontalmente a partir da borda do rochedo e que um eixo to sofreu uma desaceleração constante, qual foi o módulo da força *y* é raçado vericalmente para cima. Imediatamente após Tarzan pu exercida pelo galho sobre o palito?

lar da encosta, a tensão do cipó é 760 N. Nesse instante, quais são ••31 Um bloco começa a subir um plano inclinado sem arito com (a) a força do cipó sobre Tarzan em termos dos vetores unitários, a uma velocidade inicial v *0* = 3,50 /s. O ângulo do plano inclinado força resultante sobre Tarzan (b) em termos dos vetores uniários é) = 32,0º. (a) Que distância ao longo do plano inclinado o bloe como (c) módulo e (d) ângulo em relação ao sentido positivo do co consegue atingir? b) Quanto tempo o bloco leva para percorrer eixo *x.* Quais são (e) o módulo e () o ângulo da aceleração de Tar essa distância? (c) Qual é a velocidade do bloco ao chegar de volta zan nesse instante?

ao ponto de partida?

•24 Existem duas forças horizontais auando na caixa de 2,0 kg da ••32 A Fig. 5-39 mostra uma vista superior de um disco de 0,0250

Fig. 5-39, mas a vista superior mostra apenas uma (de módulo *F1* = kg sobre uma mesa sem arito e duas das três forçs que agem sobre o 20 N). A caixa se move ao longo do eixo *x.* Para cada um dos valo disco. A força i tem um módulo de 6,00 N e um ângulo *8*

•25 *Propulsão solar.* Um "iate solar'' é uma nave espacial com

uma grande vela que é empurrada pela luz do Sol. Embora esse

empurrão seja fraco em circunstâncias normais, pode ser suficiente

**para afasar a nave do Sol em uma viagem grauita, mas muito lena.
Figura 5-39 Problema 32.**

Suponha que a espaçonave tenha uma massa de 900 kg e receba um

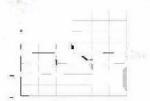
**empurrão de 20 N. (a) Qual é o módulo da aceleração resultante? ••33
Um elevador e sua carga têm uma massa toal de 1600 kg.**

**Se a nave parte do repouso, (b) que distância percorre em um dia e
Determine a tensão do cabo de sustentação quando o elevador, que (c)
qual é a velocidade no inal do dia?**

estava descendo a 12 /s, é levado ao repouso com aceleração cons

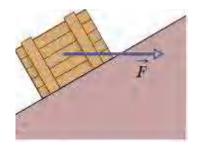
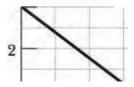
**•26 A tensão para a qual uma linha de pescar arrebenta é chama tante
em uma distância de 42 m.**

**da de "resistência" da linha. Qual é a resistência mínima necessária •
•34 Na Fig. 5-40, um caixote de massa *m* = 100 kg é empurrado para que
a linha faça parar um salmão de 85 N de peso em 11 cm se por uma
força horizontal F que o faz subir uma rampa sem atrito o peixe está
inicialmente se deslocando a 2,8 /s? Considere uma *(8* = 30,0º) com
velocidade constante. Quais são os módulos (a) desaceleração constante.**

de F e (b) da força que a rampa exerce sobre o caixote?

F

2

a

m

••42 No passado, cavalos eram usados para puxar barcaças em

canais, como mosra a Fig. 542. Suponha que o cavalo puxa o cabo

com uma força de módulo 7900 N e ânulo) = 18º em relção à

direção do movimento da barcaça, que se desloca no sentido positivo de um eixo *x.* A massa da barcaça é 9500 kg e o módulo da

8

aceleração da barcaça é 0,12 m/s2• Quais são (a) o módulo e (b) a

orientação (em relação ao sentido positivo do eixo x) da força exer

Figua 5-40 Problema 34.

cida pela água sobre a barcaça?

••35 A velocidade de uma partícula de 3,00 kg é dada por

A

A

i = (8,00ti + 3,00t2 j) m/s, com o tempo *t em* segundos. No ins-

-

.

9

tante em que a força resultante que age sobre a partícula tem um

I

módulo de 35,0 N, quais são as orientações (em relação ao sentido

- -

-

positivo do eixo x) (a) da força resultante e (b) do movimento da

partícula?

Figura 5-42 Problema 42.

••36 Um esquiador de 50 kg é puxado para o alto de uma encosta

sem arito segurando um cabo que se move paralelamente à encos ••43 Na Fig . 5 -43, uma corrente composta por cinco elos, cada ta, que faz um ân

um de massa 0,100 kg, é eruida verticalmente com uma acelera ulo de 8,0º com a horizontal. Qual é o módulo F

ção constante de módulo *a* = 2,50 m/s2• Determine o módulo (a) da

cao da força que o cabo exerce sobre o esquiador (a) se o módulo

***v* da velocidade do esquiador é constante e i**

força exercida pelo elo 2 sobre o elo 1, (b) da força exercida pelo

ual a 2,0 m/s e (b) se

***v* aumenta a uma taxa de 0,10 m/s2?**

elo 3 sobre o elo 2, (c) da força exercida pelo elo 4 sobre o elo 3 e

(d) da força exercida pelo elo 5 sobre o elo 4. Determine o módulo

• •37 Uma moça de 40 kg e um renó de 8,4 kg estão sobre a super

(e) da força *F* exercida pela pessoa que está levantando a corrente

ície sem atrito de um lago congelado, separados por uma distância sobre o elo 5 e (f) a força *resultante* que acelera cada elo.

de 15 m, mas unidos por uma corda de massa desprezível. A moça

-

exerce uma força horizontal de 5,2 N sobre a corda. Qual é o mó

F

dulo da aceleração (a) do trenó e (b) da moça? (c) A que disância

da posição inicial da moça os dois se tocam?

5

••38 Um esquiador de 40 kg desce uma rampa sem atrito que faz

um ângulo de 10º com a horizontal. Suponha que o esquiador se

4

desloca no sentido negativo de um eixo *x* orienado ao longo da

3

rampa. O vento exerce uma força sobre o esquiador de componente *F*,. Quanto vale *F*, se o módulo da velocidade do esquiador (a) é 2

constante, (b) aumenta a uma taxa de 1,0 m/s2 e (c) aumenta a uma

I

taxa de 2,0 m/s2?

Figura 5-43 Problema 43.

••39 Uma esfera com uma massa de 3,0 X 10' kg está suspensa

por uma corda. Uma brisa horizontal constante empurra a esfera de ••44 Uma lâmpada está pendurada vericalmene por um io em tal forma que a corda faz um ân

um elevador que desce com uma desaceleração de 2,4 m/s2• (a) Se a

ulo de 37º com a vertical. Determine

(a) a força da brisa sobre a bola e (b) a tensão da corda.

tensão do fio é 89 N, qual é a massa da lâmpada? (b) Qual éa tensão

do io quando o elevador sobe com uma aceleração de 2,4 m/s2?

••40 Uma caixa com uma massa de 5,00 kg soe uma rampa sem

atrito que faz um ângulo) com a horizontal. A Fig. 5-41 mostra, ••45 Um elevador que pesa 27,8 kN move-se para cima. Qual é em função do tempo *t*, a componente v, da velocidade da caixa ao a tensão do cabo do elevador se a velocidade (a) está aumentando longo de um eixo *x* orienado para cima ao longo da rampa. Qual é a uma axa de 1,22 m/s2 e (b) está diminuindo a uma axa de 1,22

o módulo da força normal que a rampa exerce sobre a caixa?

m/s2?

• •46 Um elevador é puxado para cima por um cabo. O elevador

v

e seu único ocupante têm uma massa toal de 2000 kg. Quando o

x (m/s)

4

ocupante deixa cair uma moeda, a aceleração da moeda em relação

ao elevador é 8,00 m/s2 para baixo. Qual é a tensão do cabo?

••47

A fall1ia Zacchini icou famosa pelos números de circo em que um membro da famlia era disparado de um canhão com 1--

------ l *t* (s)

[illegible] -_.**

_

3

a ajuda de elásicos ou ar comprimido. Em uma versão do número,

- 2 --;.- -

Emanuel Zacchini foi disparado por cima de três rodas gigantes e

aterrissou em uma rede, na mesma alura que a boca do canhão, a

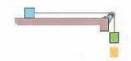
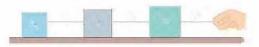
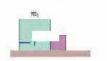
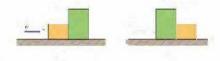
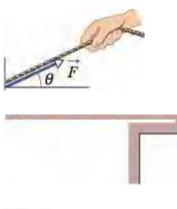
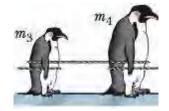
Figura 5-41 Problema 40. - 4

69 m de distância. Ele foi impulsionado dentro do cano por uma

distância de 5,2 m e lançado com um ângulo de 53°. Se sua massa

••41 Usando um cabo que arrebentará se a tensão exceder 387 era 85 kg e ele sofreu uma aceleração constante no interior do cano, N, você precisa baixar uma caixa de telhas velhas com um peso qual foi o módulo da força responsável pelo lançamento? *(Sugestão:*

de 449 N a partir de um ponto a 6,1 m acima do chão. (a) Qual é o trate o lançamento como se acontecesse ao longo de uma rampa de módulo da aceleração da caixa que coloca o cabo na iminência de 53°. Despreze a resistência do ar.) arrebentar? (b) Com essa aceleração, qual é a velocidade da caixa • •48 Na Fig . 5-44, os elevadores *A* e *B* estão ligados por um cabo e ao atingir o chão?

podem ser levantados ou baixados por outro cabo que esá acima do

elevador *A*. A massa do elevador *A* é 1700 kg; a massa do elevador ••52 Um homem de 85 g desce de uma altura de 10,0 m em rela

_B_ é 1300 kg. O piso do elevador _A_ sustenta uma caixa de 12,0 kg. A ção ao solo pendurado em uma corda que passa por uma roldana sem tensão do cabo que liga os elevadores é 1,91 X 104 N. Qual é o módulo arito e esá presa na outra exremidade a um saco de areia de 65 kg.

da força normal que o piso do elevador _A_ exerce sobre a caixa?

Com que velocidade o homem atinge o solo se partiu do repouso?

••53 Na Fig. 548, rês blocs conecados são puxados para a direia

sobre uma mesa horizontal sem atrito por uma força de módulo _T3_ =

**65,0 N. e m1 = 12,0 kg, _m2_ = 24,0 kg e _m3_ = 31,0 kg, calcule (a) o [illegible]

módulo da aceleração do sistema, (b) a tensão _T,_ e (c) a tensão _T2_•

_A_

n

_T1_

_T2_

_i;,_

_m1_

_mi_

_/ 1

Figura 5-48 Problema 53.

Figura 5-44 Problema 48.

••54 A Fig. 549 mostra quaro pinguins que estão sendo puxados

sobre gelo muito escoregadio (sem atrito) por um zelador. As mas

••49 Na Fig. 5-45, um bloco de massa *m* = 5,00 kg é puxado ao sas de rês pinguins e as tensões em duas das cordas são m, = 12

longo de um piso horizontal sem arito por uma corda que exerce kg, *m3* = 15 kg, *m4* = 20 kg, *T2* = 111 N e *T4* = 222 N. Determine uma força de módulo *F* = 12,0 N e ângulo *J* = 25,0º. (a) Qual é o a massa do pinguim *m2*, que não é dada.

módulo da aceleração do bloco? (b) O módulo da força F é aumentado lentamente. Qual é o valor do módulo da força imediatamente antes de o bloco perder conato com o piso? (c) Qual é o módulo

da aceleração do bloco na situação do item (b)?

Figura 5-49 Problema 54.

m

• •55 *Dois* blocos estão em contato em uma mesa sem atrito. Uma

Figura 5-45 Problemas 49 e 60.

força horizonal é aplicada ao bloco maior, como mosra a Fig. 5-50.

(a) Se m, = 2,3 kg, *m2* = 1,2 kg e *F* = 3,2 N, determine o módulo

••50 Na Fig. 5-46, três caixas são conecadas por cordas, uma das da força enre os dois blocos. b) Mosre que se uma força de mesquais passa por uma polia de atrito e massa desprezíveis. As massas mo módulo *F* for aplicada ao menor dos blocos no sentido oposto, das caixas são m

o módulo da força entre os blocos será 2,1 N, que não é o mesmo

1 = 30,0 kg, m *8* = 40,0 kg e me = 10,0 kg. Quando o conjunto é liberado a partir do repouso, (a) qual é a tensão da valor calculado no *iem* (a). (c)

Explique a razão da diferença.

corda que liga *B* a *C* e (b) que distância *A* percorre nos primeiros 0,250 s (supondo que não atinja a polia)?

.4

Figura 5-50 Problema *55.*

B

1

Figura 5-46 Problema 50.

De ••56 Na Fig. 5-5la, uma força horizontal constante ;, é aplicada

ao bloco *A,* que empurra um bloco *B* com uma força de 20,0 N *di*

••51 A Fig. 5-47 mosra dois blcos ligados por uma corda (de rigida horizontalmente para a direia. Na Fig. *5-5* lb, a mesma força massa desprezível) que passa por uma polia sem atrito (também ;, é aplicada ao bloco *B;* desta vez, o bloco *A* empurra o bloco *B*

de massa desprezível). O conjunto é conhecido como *mquia de* com uma força de 10,0 N dirigida horizontalmente para a esquerda.

***Avood.* Um bloco tem massa m**

Os blocos têm uma massa total de 12,0 kg. Quais são os módulos

1 = 1,30 kg; o ouro tem massa *m2* =

2,80 kg. Quais são (a) o módulo da aceleração dos blocos e b) a (a) da aceleração na Fig. 5-51a e (b) da força F *0?*

tensão da corda?

- *A B*

-

B A

***F* .**

.

a

-<>

1

•

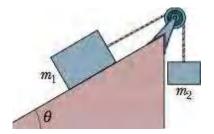
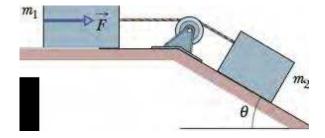
(a)

(b)

Figura 5-51 Problema 56.

• •57 Um bloco de massa m1 = 3,70 kg sobre um plano sem atrito inclinado, de ângulo *J* = 30,0º, está preso por uma corda de massa desprezível, que passa por uma polia de massa e arito desprezíveis,

Figua 5-47 Problemas 51 e 65.

a um outro bloco de massa *m2* = 2,30 kg (Fig. 5-52). Quais são (a)

Bananas

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - 1

117

o módulo da aceleração de cada bloco, (b) o sentido da aceleração ••60 A Fig. 5-45 mosa um bloco de 5,00 kg sendo puxado em do bloco que está pendurado e (c) a tensão da corda?

um piso sem atrito por uma corda que aplica uma força de módulo

constante de 20,0 N e um ângulo *8(t)* que varia com o tempo. Quando o ângulo) chega a 25°, qual é a taxa de variação da aceleração do bloco se (a) *8(t)* = (2,00 X 10-2 graus/s)t e (b) *8(t)* = -(2,00 X

1 0 -2 graus/s)t? *(Sugestão:* Transforme os graus em radianos .)

• • 61 Um balão de ar quente de massa *M* desce vericalmente com

Figura 5-52 Problema 57.

uma aceleração para baixo de módulo *a.* Que massa (lastro) deve ser

jogada para fora para que o balão tenha uma aceleração para cima

••58 A Fig. 5-53 mosra um homem sentado em uma cadeira prede módulo *a?* Suponha que a força verical para cima do ar quente sa a uma corda de massa desprezível que passa por uma roldana de sobre o balão não muda com a perda de massa.

massa e atrito desprezíveis e desce de vola às mãos do homem. A •• •62

No arremesso de peso, muitos atleas prefrem lançar

massa toal do homem e da cadeira é 95,0 kg. Qual é o módulo da o peso com um ângulo menor que o ângulo teórico (cerca de 42°) força com a qual o homem deve puxar a corda para que a cadeira para o qual a distância é máxima para um peso arremessado com suba (a) com velocidade constante e (b) com uma aceleração para a mesma velocidade e da mesma altura. Uma razão tem a ver com cima de 1,30 m/s2? *(Sugesão:* um diarama de oorpo livre pode a velocidade que o atleta pode imprimir ao peso durante a fase de ajudar bastante.) Se no lado direito a corda se estende até o solo e é aceleração. Suponha que um peso de 7.260 kg é acelerado ao longo puxada por oura pessoa, qual é o módulo da força com a qual essa de uma trajetória reta com 1,650 m de comprimento por uma força pessoa deve puxar a corda para que o homem suba (c) com veloci consante de módulo 380,0 N, começando com uma velocidade de dade constante e (d) com uma aceleração para cima de 1,30 m/s2? 2,500 m/s (devido ao movimento preparatório do atlea). Qual é a Qual é o módulo da força que a polia exerce sobre o teto (e) no item velocidade do peso no nal da fase de aceleração se o ângulo enre a, (f) no item b, (g) no item c e (h) no item d?

a trajetória e a horizontal é (a) 30,000 e (b) 42,00°? *(Sugestão:* trate o movimento como se fosse ao longo de uma rampa com o ângulo

dado.) (c) Qual é a redução percentual da velocidade de lançamento

se o aleta aumenta o ângulo de 30,00° para 42,00°?

•••63 A Fig. 5-55 mosra, em função do tempo, a componente

***F,* da força que age sobre um bloco de gelo de 3,0 kg que pode se**

deslocar apenas ao longo do eixo *x.* Em *t* = O, o bloco está se movendo no sentido posiivo do eixo, com uma velocidade de 3,0 m/s.

Quais são (a) o módulo da velocidade do bloco e (b) o senido do

movimento do bloco no instante *t* = 11 s?

2

L'

"

oura exremidade a um caixote de 15 kg, inicialmente em repouso

1 '

/

/

no solo (Fig. 5-54). (a) Qual é o módulo da menor aceleração que o

4

1 '

j

macaco deve ter para levantar o caixote? Se, após o caixote ter sido
Figura 5-55 Problema 63.

erguido, o macaco parar de subir e se agarrar à corda, quais são (b)

o módulo e (c) o sentido da aceleração do macaco e (d) a tensão da • ••64
A Fig. 5-56 mostra uma caixa de massa *m*

corda?

***2* = 1,0 kg sobre**

um plano inclinado sem atrito de ângulo) = 30º. Ela está ligada

por uma corda de massa desprezível a uma caixa de massa *m,* =

3,0 kg sobre uma superfície horizontal sem arito. A polia não tem

arito e sua massa é desprezível. (a) Se o módulo da força horizontal

F é **2,3 N, qual é a tensão da corda? (b) Qual é o maior valor que o módulo de *F* pode ter sem que a corda ique rouxa?**

Figura 5-56 Problema 64.

• • •65 A Fig. 5-47 mostra uma *mquia de Atwood,* na qual dois

Figura 5-54 Problema 59.

recipientes estão ligados por uma corda (de massa desprezível) que

passa por uma polia sem atrito (ambém de massa desprezível). No

instante *t* = O, o recipiente 1 tem uma massa de 1,30 kg e o recipiente

2 tem uma massa de 2,80 kg, mas o recipiente 1 está perdendo massa

(por causa de um vazamento) a uma taxa constante de 0,200 kg/s.

Com que taxa o módulo da aceleração dos recipientes está variando Figura 5-59 Problema 69.

(a) em *t* = O e (b) em *t* = 3,00 s? (c) Em que instante a aceleração atinge o valor máximo?

70 _ Um homem de 80 kg salta para um pátio de concreto de

•••66 A Fig. 5-57 mosra parte de um teleférico. A massa máxima uma janela a 0,50 m de altura. Ele não dobra os joelhos para amorpermitida de cada cabina com passageiros é 2800 kg. As cabinas, tecer o impacto e leva 2,0 cm para parar. (a) Qual é a aceleração que estão penduradas em um cabo de sustentação, são puxadas por média desde o instante em que os pés do homem tocam o solo até o um segundo cabo ligado à torre de sustentação de cada cabina. Su instante em que o corpo se imobiliza? (b) Qual é o módulo da força ponha que os cabos estão esticados e inclinados de um ângulo *8* = média que o pátio exerce sobre o homem?

35º. Qual é a diferença enre as tensões de trechos contíguos do cabo 71 A Fig. 5-60 mostra uma caixa de dinheiro sujo (massa m que puxa as cabinas se elas estão com a máxima massa permiida e

1 =

3,0 kg) sobre um plano inclinado sem atrito de ângulo 8

estão sendo aceleradas para cima a 0,81 m/s2?

1 = 30º . A

caixa está ligada por uma corda de massa desprezível a uma caixa

de dinheiro lavado (massa *m2* = 2,0 kg) siuada sobre um plano in

Cabo de sustentação

clinado sem atrito de ângulo 8 *2* = 60º. A polia não tem atrito e a

Cabo de tração

massa é desprezível. Qual é a tensão da corda?

Figura 5-60 Problema 71.

72 Três forças atuam sobre uma partícula que se move com

A

A

velocidade constante *v* = (2 m/s)i -(7 m/s)j . Duas das forças

Figura 5-57 Problema 66.

são i =

A

(2 N)i +(3 N)] +(- 2

N)k e *;* = (-5 N)i + (8 N)] +

(- 2 N)k. Qual é a terceira força?

•••67 A Fig. 5-58 mostra rês blocos ligados por cordas que passam 73 Na Fig. 5-61, uma lata de antioxidantes (m1 = 1,0 kg) sobre por polias sem atrito. O bloco *B* está sobre uma mesa sem arito; as um plano inclinado sem arito está ligada a uma lata de apresuntado massas são m1 = 6,00 kg, m8 = 8,00 kg e me = 10,0 kg. Qual é a *(m2* = 2,0 kg). A polia tem massa e arito desprezíveis. Uma força tensão da corda da direita quando os blocos são liberados?

vertical para cima de módulo *F* = 6,0 N aua sobre a lata de apresuntado, que tem uma aceleração para baixo de 5,5 m/s2• Determine

B

(a) a tensão da corda e (b) o ângulo 3.

e

Figura 5-58 Problema 67.

•••68

-Um arremessador de peso lança um peso de 7260 kg

empurrando-o ao longo de uma linha reta com 1650 m de comprimento e um ângulo de 34,10° com a horizontal, acelerando o peso até a velocidade de lançamento de 2,500 m/s (que se deve ao movimento preparatório do atleta). O peso deixa a mão do aremessador a uma alura de 2,110 me com um ângulo de 34,100 e percorre uma

-

distância horizontal de 15,90 m. Qual é o módulo da força média

F

que o atleta exerce sobre o peso durante a fase de aceleração? *(Su*
Figura 5-61 Problema 73.

gestão: **rate o movimento durante a fase de aceleração como se**

fosse ao longo de uma rampa com o ângulo dado.)

74 As duas únicas forças que agem sobre um corpo têm módulos

de 20 N e 35 N e direções que diferem de 80º. A aceleração resu l

Problemas dicionais

tante tem um módulo de 20 m/s2• Qual é a massa do corpo?

69 Na Fig. 5-59, o bloco *A* de 4,0 kg e o bloo *B* de 6,0 kg estão co- 75 A Fig. 5-62 é uma vista superior de um pneu de 12 kg que

-

A

nectados por uma corda de massa desprezível. A força F1 = (12 N)i está sendo puxado por três cordas horizontais. A força de uma das

-

A

atua sobre o bloco *A;* a força *F8* = (24 N)i atua sobre o bloco *B.* cordas (F1 = 50 N) esá indicada. As outras duas forças devem ser Qual é a tensão da corda?

orientadas de tal forma que o módulo *a* da aceleração do pneu seja

o menor possível. Qual é o menor valor de *a* se (a) *F2* = 30 N, *F3* = termine a aceleração da caixa (a) em termos dos vetores unitários e 20 N; (b) *F2* = 30 N, *F3* = 10 N; (c) *F2* = *F3* = 30 N?

como (b) um módulo e (c) um ângulo em relação ao senido positivo do eixo *x*.

- *y* : r,,

Figura 5-62 Problema 75.

76 Um bloco de massa *M* é puxado ao longo de uma superície

horizonal sem arito por uma corda de massa *m,* como mosra a Fig.

5-63. Uma força horizontal *P* age sobre uma das exremidades da

corda. (a) Mostre que a corda *deve* ficar frouxa, mesmo que imper
Figura 5-65 Problema 82.

ceptivelmente. Supondo que a curvatura da corda seja desprezível,

determine b) a aceleração da corda e do bloco, (c) a força da corda 83
Uma certa força imprime a um objeto de massa *m1* uma acesobre o
bloco e (d) a ensão no ponto médio da corda.

leração de 12,0 m/s2 e a um objeto de massa *i* uma aceleração de

3,30 m/s2• Que aceleração essa mesma força imprimiria a um objeto

de massa (a) *m2 - m1* e (b) *m2* + m1?

M

84 Você puxa um pequeno refrigerador com uma força consante

Figua 5-63 Problema 76.

• P em um piso encerado (sem atrito), com P na horizonal (caso 1)

ou com F inclinada para cima de um ângulo *J* (caso 2). (a) Qual é

77 Um operário arrasta um caixote no piso de uma fábrica puxan a
razão entre a velocidade do refrigerador no caso 2 e a velocidade do-o
por uma corda. O operário exerce uma força de módulo *F* = no caso 1 se
você puxa o refrigerador por um certo tempo *t?* (b) 450 N sobre a corda,
que está inclinada de um ângulo

Qual é essa razão se você puxa o refrigerador ao longo de uma certa

***J* = 38º em**

relação à horizonal, e o chão exerce uma força horizonal de mó distância d?

dulo f = 125 N que se opõe ao movimento. Calcule o módulo da 85 Um artista de circo de 52 kg deve descer escoregando por uma aceleração do caixote (a) se a massa do caixote é 31 O kg e (b) se o corda que arrebentará se a tensão exceder 425 N. (a) O que acontece peso do caixote é 310 N.

se o artista fica imóvel pendurado na corda? (b) Para que módulo

78 Na Fig. 5-64, uma força F de módulo 12 N é aplicada a uma de aceleração a corda está prestes a arrebentar?

caixa de massa i = 1,0 kg. A força é dirigida para cima paralela 86 Calcule o peso de um astronauta de 75 kg (a) na Terra, (b) em mente a um plano inclinado de ângulo J = 37º. A caixa está ligada Marte, onde g = 3,7 m/s2, e (c) no espaço sideral, onde g = O. (d) por uma corda a outra caixa de massa m

Qual é a massa do asronauta em cada um desses lugares?

1 = 3,0 kg situada sobre o

piso. O plano inclinado, o piso e a polia não têm atrito e as massas 87 Um objeto está pendurado em uma balança de mola presa ao da polia e da corda são desprezíveis. Qual é a tensão da corda?

teto de um elevador. A balança indica *65* N quando o elevador está

parado. Qual é a leitura da balança quando o elevador está subindo

(a) com uma velocidade constante de 7,6 m/s e (b) com uma velocidade de 7,6 m/s e uma desaceleração de 2,4 m/s2?

m

88 Imagine uma espaçonave prestes a aterrissar na superície de

Calisto, uma das luas de Júpiter. Se o motor fonece uma força para

cima (empuxo) de 3260 N, a espaçonave desce com velocidade

Figura 5-64 Problema 78.

consante; se o motor fonece apenas 2200 N, a espaçonave desce

com uma aceleração de 0,39 m/s2• (a) Qual é o peso da espaçonave

nas vizinhanças da superfície de Calisto? (b) Qual é a massa da a e 79 Uma cera partícula tem um peso de 22 N em um local onde ronave? (c) Qual é o módulo da aceleração em queda livre próximo

***g* = 9,8 m/s2• Quais são (a) o peso e (b) a massa da partícula em à superfície de Calisto?**

um local onde *g* = 4,9 m/s2? Quais são (c) o peso e (d) a massa

da partícula se a ela é deslocada para um ponto do espaço sideral 89 Uma turbina a jato de 1400 kg é presa à fuselagem de um avião onde g = O?

comercial por apenas três parafusos (esta é a prática comum). Suponha que cada parafuso suporte um terço da carga. (a) Calcule a 80 Uma pessoa de 80 kg salta de paraquedas e experimenta uma força a que cada parafuso é submetido enquanto o avião está parado aceleração para baixo de 2,5 m/s2• A massa do paraquedas é *5,0* kg. na pista, aguardando permissão para decolar. (b) Durante o voo, o (a) Qual é a força para cima que o ar exerce sobre o paraquedas? avião encontra uma turbulência que provoca uma aceleração brus

(b) Qual é a força que a pessoa exerce sobre o paraquedas?

ca para cima de 2,6 m/s2• Calcule a força a que é submetido cada

81 Uma espaçonave decola verticalmente da Lua, onde *g* = 1,6 parafuso durante essa aceleração.

m/s2• Se a nave tem uma aceleração verical para cima de 1,0 m/s2 90 Uma nave intereselar tem uma massa de 1,20 X 106 kg e está no instante da decolagem, qual é o módulo da força exercida pela inicialmente em repouso em relação a um sistema estelar. (a) Que nave sobre o piloto, que pesa 735 N na Terra?

aceleração constante é necessária para levar a nave até a velocidade

82 Na vista superior da Fig. 5-65, cinco forças puxam uma caixa de 0,10c (onde *e* = 3,0 X 108 m/s é a velocidade da luz) em relação de massa *m* = 4,0 kg. Os módulos das forças são *F1* = 11 N, *F2* = ao sistema estelar em 3,0 dias? b) Qual é o valor dessa aceleração 17 N, *F3* = 3,0 N, *F4* = 14 N e *F5* = *5,0* N; o ângulo 84 é 30º. De-em unidades de *g?* (c) Que força é necessária para essa aceleração?

(d) Se os motores são desligados quando a velocidade de 0,10c é 94 Por esporte, um tau de 12 kg escorrega em um grande lago atingida (fazendo com que a velocidade permaneça constante desse gelado, plano e sem arito. A velocidade inicial do atu é 5,0 m/s no momento em diante), quanto tempo leva a nave (a partir do instante sentido posiivo do eixo *x.* Considere a posição inicial do tatu sobre inicial) para viajar 5,0 meses-luz, a distância percorrida pela luz em o gelo como a origem. O animal escorrega sobre o gelo ao mesmo 5,0 meses?

tempo em que é empurrado pelo vento com uma força de 17 N no

91 Uma motociclea e seu piloto de 60,0 kg aceleram a 3,0 m/s2 sentido positivo do eixo *y.* Em termos dos vetores unitários, quais para subir uma rampa inclinada de 10º em relação à horizontal. são (a) o vetor velocidade e (b) o vetor posição do atu depois de Quais são os módulos (a) da força resultante a que é submetido o deslizar por 3,0 s?

piloto e b) da força que a motocicleta exerce sobre o piloto?

95 Suponha que na Fig. 5-12 as massas dos blocos sejam 2,0 kg e

92 Calcule a aceleração inicial para cima de um foguete de massa 4,0 kg. (a) Qual dessas massas deve ser a do bloco pendurado para 1,3 X 104 kg se a força inicial para cima produzida pelos motores que a aceleração seja a maior possível? Quais são nesse caso (b) o (empuxo) é 2,6 X 105

N. Não despreze a força graviacional a que módulo da aceleração e (c) a tensão da corda?

o foguete está submetido.

96 Para capturar um nêutron livre, um núcleo deve fazê-lo parar

93 A Fig. *5-66a* mosra um móbile pendurado no teto; ele é com em uma distância menor que o diâmero do núcleo aravés da *inteposto por duas peças de metal (m*

ração forte, a força responsável pela estabilidade dos núcleos aô

1 = 3,5 kg e m2 = 4,5 kg) ligadas

por cordas de massa desprezível. Qual é a tensão (a) da corda de micos, que é praticamente nula fora do núcleo. Suponha que, para baixo e (b) da corda de cima? A Fig. 5-66b mostra um móbile com ser capturado por um núcleo com um diâmetro d = 1,0 X 10·14 m, posto de três peças metálicas. Duas das massas são , = 4,8 kg e um nêuron livre deva ter uma velocidade inicial menor ou igual

m

a 1,4 X 107 m/s. Supondo que a força a que está sujeito o nêuron

5 = 5,5 kg. A tensão da corda de cima é 199 N. Qual é a tensão

(c) da corda de baixo e (d) da corda do meio?

no interior do núcleo é constante, determine o módulo da interação

forte. A massa do nêutron é 1,67 X 10·27 kg.

Figua 5-66 Problema 93.

(a)

(b)

FORÇA E

6

CA P Í T U LO

M OVI M E N TO - 1 1

- O QUE É FÍSICA?

Neste capíulo, concenramos nossa atenção na ísica de rês tipos comuns de

força: a força de atrito, a força de arrasto e a força centrípeta. Ao preparar um carro

para as 500 milhas de Indianápolis, um mecânico deve levar em conta os rês ipos

de força. As forças de atrito que agem sobre os pneus são cruciais para a aceleração

do carro ao deixar o boxe e ao sair das curvas (se o carro enconra uma mancha de

óleo, os pneus perdem aderência e o caro pode sair da pista). As forças de arrasto

produzidas pelas correntes de ar devem ser minimizadas, caso conrário o carro consumirá muito combustível e terá que ser reabastecido prematuramente (uma parada adicional de apenas 14 s pode custar a corrida a um piloto). As forças cenrípetas

são fundamentais nas curvas (se não houver força cenrípea suiciente, o carro não

conseguirá fazer a curva). V amos iniciar nossa discussão com as forças de arito.

6-2 Atito

As forças de arito são inevitáveis na vida diária. Se não fôssemos capazes de vencê-las, fariam parar todos os objetos que estivessem se movendo e todos os eixos que estivessem girando. Cerca de 20% da gasolina consumida por um automóvel

são usados para compensar o arito das peças do motor e da ransmissão. Por ouro

lado, se não houvesse arito, não poderíamos fazer o automóvel ir a lugar algum nem

poderíamos caminhar ou andar de bicicleta. Não poderíamos segurar um lápis, e,

mesmo que pudéssemos, não conseguiríamos escrever. Pregos e parafusos seriam

inúteis, os tecidos se desmanchariam e os nós se desatariam.

Neste capítulo ratamos de forças de arito que existem entre duas superfícies

sólidas estacionárias ou que se movem uma em relação à outra em baixa velocidade.

Considere três experimentos imaginários simples:

1. Dê um empurrão momentâneo em um livro, fazendo-o deslizar sobre uma mesa.

Com o tempo, a velocidade do livro diminui até se anular. Isso signiica que o

livro soreu uma aceleração paralela à superície da mesa, com o sentido oposto

ao da velocidade. De acordo com a segunda lei de Nwton, deve ter exisido uma

força, paralela à superície da mesa, com o sentido oposto ao da velocidade do

livro. Essa força é uma força de atrito.

2. Empurre o livro horizontalmente de modo a fazê-lo se deslocar com velocidade

consante ao longo da mesa. A força que você está exercendo pode ser a única

força horizontal que age sobre o livro? Não, porque, nesse caso, o livro soreria

uma aceleração. De acordo com a segunda lei de Newton, deve existir uma segunda força, de senido contrário ao da força aplicada por você, mas com o mesmo módulo, que equilibra a primeira força. Essa segunda força é uma força de atrito,

paralela à superfície da mesa.

3. Empurre um caixote pesado paralelamente ao chão. O caixote não se move. De

acordo com a segunda lei de Newton, uma segunda força dve estar atuando sobre

o caixote para se opor à força que você está aplicando. Essa segunda força tem o

mesmo módulo que a força que você aplicou, mas atua em sentido contrário, de

forma que as duas forças se equilibram. Essa segunda força é uma força de aito.

Empurre com mis força O caixote continua parado. Isso signiica que a força de

atrito pode aumentar de intensidade para continuar equilibrando a força aplicada. Empurre com mais força ainda. O caixote começa a deslizar. Evidentemente, existe uma intensidade máxima para a força de aito. Quando você excedeu essa

intensidade máxima, o caixote começou a se mover.

A Fig. 6-1 mostra uma situação semelhante. Na Fig. 6-la, um bloco está em repouso sobre uma mesa, com a força ravitacional g equilibrada pela força normal

Como não é aplicada

nenhuma força

horizontal, não há

FN. Na Fig. 6-lb, você exerce uma força F sobre o bloco, tentando puxá-lo para a esquerda. Em resposta, surge uma força de atrito , para a direita, que equilibra a

força que você aplicou. A força s é chamada de força de atrito estáico. O bloco

permanece imóvel.

As Figs. 6-lc e 6- ld mosram gue, à mdida que você aumenta a intensidade

da força aplicada, a intensidade da força de arito estático f, também aumenta e o bloco permanece em repouso. Entretanto, quando a força aplicada atinge uma certa

intensidade, o bloco "se desprende" da superície da mesa e sofre uma aceleração

para a esquerda (Fig. 6-le). A força de atrito Jk que se opõe ao movimento na nova

situação é chamada de força de atrito nético.

Em geral, a intensidade da força de atrito cinéico, que age sobre os objetos em

movimento, é menor do que a intensidade máxima da força de arito estáico, que

age sobre os objetos em repouso. Assim, para que o bloco se mova sobre a superície com velocidade constante, provavelmente você terá que diminuir a intensidade da força aplicada depois que o bloco começar a se mover, como mostra a Fig. 6-lf

A Fig. 6- lg mosra o resultado de um experimento no qual a força aplicada a um

bloco foi aumentada lentamente até que o bloco começasse a se mover. Observe que

a força necessária para manter o bloco em movimento com velocidade consante é

menor que a necessária para que o bloco comece a se mover.

A força de arito é, na verdade, a soma vetorial de muitas forças que agem enre

os átomos da superfície de um corpo e os átomos da superície do ouro corpo. Se

duas superícies metálicas polidas e limpas são colocadas em contato em alto vácuo

(para que continuem limpas), toma-se impossível fazer uma deslizar em relação à

outra. Como as superfícies são lisas, muitos átomos de uma das superícies enram

em contato com muitos átomos da outra e as superfícies se solam a frio, formando

uma única peça de metal. Se dois blocos de metal, muito polidos, usados para calibrar tomos, são colocados em conato no ar, existe menos contato

entre os átomos, mas, mesmo assim, os blocos aderem memente e só podem ser separados por um

movimento de torção. Em geral, porém, esse grande número de contatos enre átomos não existe. Mesmo uma superfície metálica altamente polida está longe de ser uma superície plana em escala atômica. Além disso, a superfície dos objetos comuns

possui uma camada de óxidos e outras impurezas que reduzem a soldagem a frio.

Quando duas superfícies comuns são colocadas em contato, somente os pontos

mais salientes se tocam. (É como se virássemos os Alpes Suíços de cabeça para baixo e os colocássemos em contato com os Alpes Austríacos.) A área microscópica de contato é muito menor que a aparente área de contato macroscópica, possivelmente

104 vezes menor. Mesmo assim, muitos pontos de contato se soldam a frio. Essas

soldas são responsáveis pelo arito estáico que surge quando uma força aplicada

tenta fazer uma superície deslizar em relação à outra.

Se a força aplicada é suiciente para fazer uma das superícies deslizar, ocore

uma ruptura das soldas (no insante em que começa o movimento) seguida por um

processo conínuo de formação e ruptura de novas soldas enquanto ocorre o movi

(a)

mento relativo e novos contatos são formados aleatoriamente (Fig. 6-2). A força de

arito cinéico , que se opõe ao movimento é a soma vetorial das forças produzidas

por esses contatos aleatórios.

Se as duas superfícies são pressionadas uma contra a outra com mais força, mais

pontos se soldam a frio. Nesse caso, para fazer as superfícies deslizarem uma em

relação à oura, é preciso aplicar uma força maior, ou seja, o valor da força de arito

(b)

estático s é maior. Se as superfícies estão deslizando uma em relação à outra, pas Figua 6-2 Mecanismo responsável sam a existir mais pontos momentâneos de soldagem a frio, de modo gue a força de pela força de atrito cinéico. (a) A placa arito cinéico h também é maior.

de cima esá deslizando para a direita

Frequentemente, o movimento de deslizamento de uma superfície em relação à em relação à placa de baixo. (b) Nesta vista ampliada são mosrados dois

outra ocore "aos solavancos" porque os processos de soldagem e ruptura se alter pontos onde ocorreu soldagem a rio.

nam. Esses processos repeitivos de derência e deslizamento podem produzir sons E necessária uma força para romper as desagradáveis, como o canar de pneus no asfalto, o barulho de uma unha arranhando soldas e manter o movimento.

$f_{s,máx} = \mu_s F_N$,

um quadro-negro e o rangido de uma dobradiça enferrujada. Podem também poduzir

sons melodiosos, como o de um violino bem tocado.

-

6-3 Propriedades do Atrito

A experiência mosra que, quando um corpo seco não lubriicado pressiona uma superície nas mesmas condições e uma força F tenta fazer o corpo deslizar ao longo da superície, a força de atrito resultante possui rês propriedades: -

Propriedade 1. Se o corpo não se move, a força de arito esáico s e a componente

de F paralela à superície se equilibram. As duas forças têm módulos iguais e

. tem o sentido oposto ao da componente de F.

Propriedade 2. O módulo de . possui um valor máximo s,má, que é dado por

(6-1)

onde L é o coeiiente de atrito estáico e F

s

N é o módulo da força normal que

a superície exerce sobre o corpo. Se o módulo da componente de F paralela à

superície excede s.nm• o corpo começa a deslizar sobre a superfície.

Propriedade 3. Se o corpo começa a deslizar sobre a superície, o módulo da força

de arito diminui rapidamente para um valor , dado por

Ík = LkFN,

(6-2)

onde Lk é o coeficiente de atrito cinético. Daí em diante, durante o desliza-

-

mento, uma força de arito cinéico fk de módulo dado pela Eq. 6-2 se opõe ao

movimento.

O módulo F N da força normal aparece nas propriedades 2 e 3 como uma medida

da força com a qual o corpo pressiona a superície. De acordo com a terceira lei de

Newton, se o corpo pressiona com mais força, FN é maior. As propriedades 1 e 2 foram

expressas em termos de uma única força aplicada F, mas também são válidas para

a resultante de várias forças aplicadas ao corpo. As Eqs. 6-1 e 6-2 não são equações

- -

vetoriais; os vetores s e i, são sempre paralelos à superície e têm o senido oposto

ao da tendência de deslizamento; o vetor F' é perpendicular à superfície.

Os coeicientes L e

s

Lk são adimensionais e devem ser determinados experimentalmente. Seus valores dependem das propriedades anto do corpo como da super

ície; por isso, qualquer menção aos coeficientes de arito costuma ser seguida pela

preposição "entre", como em "o valor de L entre um ovo e uma rigideira de Teflon s

é 0,04, mas o valor entre uma bota de alpinista e uma pedra pode chegar a 1,2". Em geral, supomos que o valor de Lk não depende da velocidade com a qual o corpo

desliza ao longo da superície.

"TESTE 1

Um blco repousa sobre um piso. (a) Qual é o módulo da força de atrito que o piso

exerce sobre o bloco? (b) Se uma força horiwntal de 5 N é aplicada ao bloco, mas o

bloco não se move, qual é o módulo da força de atrito? (c) Se o valor máximo,.má, da

força de atrito estático que age sobre o bloco é 10 N, o bloco se move quando o módulo

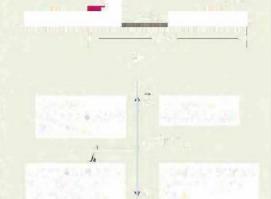
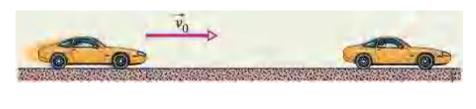
da força aplicada horizontalmente é aumentado para 8 N? (d) E se o módulo da força for

aumentado para 12 N? (e) Qual é o módulo da força de atrito no item (c)?

Exemplo

Atito cinético, aceleração constante, rodas bloqueadas

Se as rodas de um carro ficam "bloqueadas" (impedidas de pequenos rechos de asfalto fundido formam as "marcas de girar) durante uma frenagem de emergência, o caro des derrapagem" que revelam a ocorrência de uma soldagem liza na pisa. Pedaços de borracha arrancados dos pneus e a rio. O recorde de marcas de derrapagem em via pública

x

foi estabelecido em 1960 pelo motorista de um Jaguar na

v=O

rodovia Ml, na Inglaterra Fig. 6-3a): as marcas inham

290 m de comprimento! Supondo que μ

μ = 0,60

k = 0,60 e que a

aceleração do carro se manteve constante durante a frena

--

-

-

- 290 m -

-

-

-

A força de atrito não

A força gravitacional

é o sentido posiivo do eixo x (Fig. 6-3b). Podemos reladeixa os pneus

- puxa o carro para

cionar essa força à aceleração escrevendo a segunda lei de

girarem em falso.

F g baixo.

Newton para as componentes x (F esx = max) como

(b)

-fk = ma,

(6-3) Figura 6-3 (a) Um carro deslizando para a direita e

onde m é a massa do carro. O sinal negativo indica o sentido fnalmente parando após se deslocar 290 m. (b) Diarama de da força de atrito cinéico.

corpo livre do carro .

álculs De acordo com a Eq. 6-2, o módulo da força de uma das equações do Capítulo 2 para objetos com aceleatrito é h = [illegible] N, onde F N é o módulo da força normal que a esrada exerce sobre o caro. Como o carro não está ração constante. Sabemos que o deslocamento x -x 0 foi acelerando verticalmente, sabemos pela Fig. 6-3b e pela 290 m e supomos que a velocidade inal v foi O. Substituindo a pelo seu valor, dado pela Eq. 6-4, e explicitando segunda lei de Newton que o módulo de FN é igual ao mó- v

dulo da força gravitacional F

0, obtemos

veloci o Jaguar saiu da esrada depois de percorrer 290 m com dade. Em seguida, usamos a Eq. 2-16,

as rodas bloqueadas. Assim, o valor de v0 era pelo menos

210 km/h.

v2 = vã + 2a(x -xo),

(6-5)

xemplo

Atrito, força inclinada

Na Fig. 6-4a, um bloco de massa m = 3,0 kg escorrega em dado pela Eq. 6-2 i = µ,"v, onde FN é a força normal).

um piso enquanto uma força F de módulo 12 N, fazendo O senido é oposto ao do movimento (o arito se opõe ao um ângulo } para cima com a hoizontal, é aplicada ao blo escorregamento).

co. O coeiciente de atrito cinético enre o bloco e o piso

é µk = 0,40. O ângulo } pode variar de O a 90° (o bloco Cálcuo de FN Como precisamos conhecer o módulo h da permanece sobre o piso). Qual é o valor de} para o qual força de arito, vamos calcular primeiro o módulo F,v da o módulo a da aceleração do bloco é máximo?

força normal. A Fig. 6-4b é um diagrama de corpo livre

que mostra as forças paralelas ao eixo vertical y. A força

I D EIAS-CHAVE

normal é para cima, a força ravitacional F8, de módulo

Como o bloco está em movimento, a força de atrito en mg, é para baixo e a componente verical FY da força aplivolvida é a força de atrito cinético. O

módulo da força é cada é para cima Essa componente aparece na Fig. 6-4c,

(RcsposLa)

longo do eixo x, temos:

Comentário Quando aumentamos } a parir de O, a campo-

Fcos O - µJ'N = ma.

(6-9) nente y da força aplicada F aumenta, o que diminui a força

normal. Esta diminuição da força normal faz diminuir a

Subsituindo FN por seu valor, dado pela Eq. 6-8, e expli força de atrito, que se opõe ao movimento do bloco. Assim, citando a, obtemos:

a aceleração do bloco tende a aumentar. Ao mesmo tempo,

F

F

porém, o aumento de } diminui a componente horizontal

a = - cos) - (

,k g - - - sen)

J

(6-10)

1n

n1

de ', o que diminui a aceleração. Essas tendências opostas

fazem com que a aceleração seja máxima para } = 22º.

-

sólido (seja porque o corpo se move aravés do fluido, seja porque o luido passa pelo corpo), o corpo experimenta uma força de arrasto > que se opõe ao movimento relaivo e é paralela à direção do movimento relaivo do luido.

Examinaremos aqui apenas os casos em que o fluido é o ar, o corpo é rombudo

(como uma bola) e não fino e pontiagudo (como um dardo) e o movimento relativo

é suficientemente rápido para produzir uma turbulência no ar (formação de redemoinhos) arás do corpo. Nesse caso, o módulo da força de arrasto > está relacionado à velocidade escalar v através da equação

(6-14)

onde C é um parâmero determinado experimentalmente, conhecido como coeiciente de arrasto, p é a massa especíica do ar (massa por unidade de volume) e A

é a área da seção reta efetiva do corpo (a área de uma seção reta perpendicular à

velocidade v). O coeficiente de arrasto C (cujos valores ípicos variam de 0,4 a 1,0)

Tabela 6-1

Algumas Velocidades Terminais no Ar

Objeto	*Velocidade Terminal (m/s)*	*Distância[a] para 95% (m)*
Peso (do aremesso de peso)	*145*	*2500*

Paraquedisa em queda livre (típico)

60

430

Bola de beisebol

42

210

Bola de tênis

31

115

Bola de basquete

20

47

Bola de pingue-pongue

9

10

Gota de chuva (raio = 1,5 mm)

7

6

Paraquedista (ípico)

5

3

"Distância da queda necessária para atingir 95% da velocidade tenninal.

Fonte: adaptado de eter J. Brancazio, Spot Science, 1984, Simon & Scbuster, NewYork.

Figua 6-5 A esquiadora se agacha

não é constante para um dado corpo, já que depende da velocidade. Aqui, ignorare na "posição de ovo" para minimizar mos tais complicações.

a área da seção reta efetiva e assim

Os esquiadores sabem muito bem que a força de arrasto depende de A e de 2 reduzir a força de arasto. (Karl-Josef

•

Para alcançar altas velocidades, um esquiador procura reduzir o valor de D, adotan Hildenbran/dpaLLC) do, por exemplo, a "posição de ovo" (Fig. 6-5) para minimizar A.

Quando um corpo rombudo cai a parir do repouso, a força de arrasto D produzida pela resistência do ar é dirigida para cima e seu módulo cresce gradualmente,

-

a parir de zero, com o aumento da velocidade do corpo. A força D para cima se opõe à força gravitacional g, dirigida para baixo. Podemos relacionar essas forças

à aceleração do corpo escrevendo a segunda lei de Newton para um eixo vertical y

(F es,y = may):

D - F = n1a.

(6-15)

1

onde m é a massa do corpo. Como mosra a Fig. 6-6, se o corpo cai por um tempo

suficiente, D acaba se tomando igual a F8• De acordo com a Eq. 6-15, isso significa que a = O e, portanto, a velocidade do corpo para de aumentar. O corpo passa, então,

a cair com uma velocidade constante, a chamada velocidade teminal v"

Para determinar v,, fazemos a = O na Eq. 6-15 e subsituímos o valor de D dado Quando a velocidade

pela Eq. 6-14, obtendo

do gato aumenta, a

força de arrasto

1CpAvf - g = O,

-J

aumenta até equilibrar

a força gravitacional.

-

donde

2g

-

D

Como o gato ambém sente a aceleração, fica assustado e mantém as patas abaixo

(a)

(b)

(e)

do corpo, encolhe a cabeça e encurva a espinha para cima, reduzindo a área A, au Figua 6-6 Forças a que está mentando v, e provavelmente se ferindo na queda.

submetido um corpo em queda livre

Entreanto, se o gato ainge v, durante uma queda mais longa, a aceleração se no ar. (a) O corpo no momento em que começa a cair; a única força presente é

anula e o gato relaxa um pouco, esticando as patas e pescoço horizontalmente para a força gravitacional. (b) Diagrama de fora e endireitando a espinha (o que o faz icar parecido com um esquilo voador). corpo livre durane a queda, incluindo Isso produz um aumento da área A e, consequentemente, de acordo com a Eq. 6-14, a força de arrasto. (e) A força de arrasto aumentou até se tomar iual à

força gravitacional. O corpo agora cai

** W.O. Wbitney eC.J. Mehlbaf, "High-Rise Syndrome in Cats". The Jounal oftheAmerican Veterinay com velocidade constante, a chamada*

MedicalAssociation, 1987.

velocidade terminal.

um aumento da força de arrasto D. O gato começa a diminuir de velocidade, já que,

agora, D > F8 (a força resultante aponta para cima), até que uma velocidade terminal v, menor seja aingida. A diminuição de v, reduz a possibilidade de que o gato se machuque na queda. Pouco antes do im da queda, ao perceber que o chão está

próximo, o gato coloca novamente as patas abaixo do corpo, preparando-se para o

pouso.

-

Os seres humanos muitas vezes saltam de randes alturas apenas pelo prazer

de "voar". Em abril de 1987, durante um salto, o paraquedista Gregory Robertson

percebeu que a colega Debbie Williams havia desmaiado ao colidir com um terceiro

paraquedista e, portanto, não inha como abrir o paraquedas. Robertson, que estava

muito acima de Debbie e ainda não tinha aberto o paraquedas para a descida de 4

Figua 6-7 Paraquedistas na "posição

mil meros, colocou-se de cabeça para baixo para minimizar A e maximizar a velode águia", que maximiza a força de cidade da queda. Depois de atingir uma velocidade terminal esimada de 320 km/h,

arrasto. (Steve Fitchettfx!Gety

alcançou a moça e assumiu a "posição de águia" (como na Fig. 6-7) para aumentar

Images)

D e conseguir agarrá-la. Abriu o paraquedas da moça e em seguida, após soltá-la,

abriu o próprio paraquedas, quando faltavam apenas 10 segundos para o impacto.

Williams soreu várias lesões intenas devido à falta de conrole na aterrissagem,

mas sobreviveu.

Exemplo

Velocidade teminal de uma gota de chuva

Uma gota de chuva de raio R = 1,5 mm cai de uma nu para não confundir a massa especica do ar, p.,, com a vem que está a uma altura h = 1200 m acima do solo. O massa especíica da água, Pa, obtemos:

coeiciente de arasto C da gota é 0,60. Suponha que a

gota permanece esférica durante toda a queda. A massa

8TR 3 p,g

8Rp'g

*v, = [illegible]

específica da água, Pa, é 1000 kg/m3 e a massa especfica

Cp.A

3Cp.,R 2

3Cp 0

do ar, Pan é 1,2 kg/m3•

(8)(1,5 X 1 o-3 m)(1000 kg/m3)(9,8 m/s2)

=

(a) De acordo com a Tabela 6-1, a gota atinge a velocida

\

(3)(0,60)(1,2 kg/m3)

de terminal depois de cair apenas alguns meros. Qual é a

= 7,4 m/s = 27 km/h.

(Resposta)

velocidade terminal?

Note que a altura da nuvem não entra no cálculo.

IDEIA-CHAVE

(b) Qual seria a velocidade da gota imediatamente antes do

A goa ainge a velocidade terminal v, quando a força gra impacto com o chão se não existisse a força de arasto?

vitacional e a força de arrasto se equilibram, fazendo com

que a aceleração seja nula. Poderíamos aplicar a segunda

IDEIA-CHAVE

lei de Newton e a equação da força de arrasto para calcular Na ausência da força de arrasto para reduzir a velocidade v, mas a Eq. 6-16 já faz isso para nós.

da gota durante a queda, a gota cairia com a aceleração

constante de queda livre g e, portanto, as equações do

Cálculs Para usar a Eq. 6-16, precisamos conhecer a movimento com aceleração constante da Tabela 2-1 podem área efetiva da seção reta A e o módulo F da força gravi ser usadas.

8

tacional. Como a gota é esférica, A é a área de um círculo

(7TR 2) com o mesmo raio que a esfera. Para determinar F

Clculo Como sabemos que a aceleração é g, a velocidade

8,

usamos rês fatos: (1) F

inicial v

8 = mg, onde m é a massa da goa;

0 é zero e o deslocamento x - x0 é -h, usamos a Eq.

(2) o volume da gota (esférica) é V= [illegible] TR3 e (3) a massa 2-16 para calcular v: específica da água da gota é igual à massa por unidade de

v = , = V(2)(9,8 m/s2)(1200 m)

volume: P

= 153 m/s = 550 km/h.

(Resposta)

a = m/V. Assim, temos;

F

Se Shakespeare soubesse disso, diicilmente teria escrito:

1 = Vp.g = ;,R3p.g.

"Gota a gota ela cai, tal como a chuva benéfica do céu."

Em seguida, substituímos esse resultado, a expressão para Na verdade, esta é a velocidade de uma bala disparada por

A e os valores conhecidos na Eq. 6-16. Tomando cuidado uma arma de grosso calibre!

6-5 Movimento Circular Uniforme

Como vimos na Seção 4-7, quando um corpo descreve uma circunferência (ou um

arco de circunferência) com velocidade escalar constante v, dizemos que se enconra

em movimento circular uniforme. Vimos ambém que o corpo possui uma aceleração

cenrípeta (dirigida para o centro da circunferência) de módulo constante dado por

,

v-

a = -

R

(aceleração centríeta).

(6-17)

onde Ré o raio do círculo.

Vamos examinar dois exemplos de movimento circular uniforme:

1. Fazendo uma curva de carro. Você está senado no centro do banco raseiro de um caro que se move em alta velocidade em uma estrada plana. Quando o motorista

faz uma curva brusca para a esquerda e o carro descreve um arco de circunferência, você escorega para a direia sobre o assento e fica comprimido contra a porta do carro durante o resto da curva. O que está acontecendo?

Enquanto o carro esá fazendo a curva, ele se enconra em movimento circular

uniforme, ou seja, possui uma aceleração dirigida para o cenro da circunferência.

De acordo com a segunda lei de Newton, deve haver uma força responsável por

essa aceleração. Além disso, a força também deve esar dirigida para o centro da

circunferência. Assim, rata-se de uma força entrípeta, onde o adjetivo indica a

direção da força. Neste exemplo, a força cenrípeta é a força de atrito exercida pela

esrada sobre os pneus; é raças a essa força que o carro consegue fazer a curva.

Para você descrever um movimento circular uniforme junto com o carro,

também deve existir uma força cenrípeta agindo sobre você. Enretanto, aparentemente, a força centrípeta de arito exercida pelo assento não foi suiciente para fazê-lo acompanhar o movimento circular do carro. Assim, o assento deslizou por

baixo de você até a porta direita do carro se chocar com o seu corpo. A parir desse

momento, a porta foneceu a força cenrípeta necessária para fazê-lo acompanhar

o caro no movimento circular uniforme.

2. Girando em tono a Terra. Desa vez, você esá a bordo do ônibus espacial Atlantis. Quando você e o ônibus espacial esão em órbita em torno da Terra, você flutua, como se não ivesse peso. O que está acontecendo?

T

Tanto você como o ônibus espacial estão em movimento circular uniforme e

,

possuem uma aceleração dirigida para o ceno da circunferência. Novamente, pela

-Dsco

'

- \

segunda lei de Newton, foças cenrípetas devem ser a causa dessas acelerações. Desta

Cora

I

vez, as forças enrípeas são araçes graviacionais (a aração sobre você e a aração

1

1

1

\

sobre o ônibus espacial) exercidas pela Terra e dirigidas para o cenro da Terra.

R

I

\ \

I

I

' '

"

Tanto no carro como no ônibus espacial, você está em movimento circular uni

'

.

/

. ___

forme sob a ação de uma força cenrípeta, mas experimenta sensações bem diferentes nas duas situações. No carro, comprimido contra a porta raseira, você tem consciência de que está sendo submeido a uma força. No ônibus espacial, está flu

O disco só descreve

tuando e tem a impressão de que não está sujeito a nenhuma força. Qual é a razão

um movimento circular

porque existe uma

desa diferença?

força na direção do

A diferença se deve à natueza das duas forças cenrípetas. No carro, a força cencentro.

típeta é a compressão a que é submeida a parte do seu corpo que está em contato

com a porta do caro. Você pode sentir essa compressão. No ônibus espacial, a força Figua 6-8 Vista de cima de um disco cenrípea é a aração gravitacional da Terra sobre todos os átomos do seu corpo. As de metal que se move com velocidade sim, nenhuma parte do corpo sore uma compressão e você não sente nenhuma força. constante v em uma rajetória circular de (A sensação é conhecida como "ausência de peso", mas essa descrição é enganosa. A raio R sobre uma superfície horizontal sem arito. A força centrípeta que age

aração exercida pela Terra sobre você ceramente não despareceu e, na verdade, é sobre o disco é ', a tração da corda, apenas ligeiramente menor da que existe quando você está na superfície da Terra.)

dirigida para o centro da circunferência

A Fig. 6-8 mosra ouro exemplo de força cenrípeta. Um disco de metal des ao longo do eixo radial r que passa pelo creve uma circunferência com velocidade constante v, preso por uma corda a um disco.

eixo cenral. Desta vez, a força centrípeta é a ração exercida radialmente pela corda

sobre o disco. Sem essa força, o disco se moveria em linha reta em vez de se mover

em círculos.

Observe que a força centrípeta não é um novo tipo de força; o nome simplesmente indica a direção da força. A força cenrípeta pode ser uma força de arito, uma força gravitacional, a força exercida pela porta de um carro, a força exercida por uma

corda ou qualquer oura força. Em qualquer situação:

Uma força cenípeta acelera um corpo modicando a dirção da velocidade do corpo

sem mudar a velocidade escalar.

De acordo com a segunda lei de Newton e a Eq. 6-17 (a = v2/R), podemos escrever o módulo F de uma força cenrípeta (ou de uma força cenrípeta resulante) como

v2

F = m

R

(n16dulo da força centrípeta).

(6-18)

Como a velocidade escalar v, neste caso, é consante, os módulos da aceleração cenrípeta e da força centrípeta ambém são constantes.

Por ouro lado, as direções da aceleração centrípeta e da força centrípeta não são

constantes; variam continuamente de modo a apontar sempre para o centro do círculo. Por essa razão, os vetores força e aceleração são, às vezes, desenhados ao longo de um eixo radial r que se move com o corpo e se estende do cenro do círculo até

o corpo, como na Fig. 6-8. O sentido posiivo do eixo aponta radialmente para fora,

mas os vetores aceleração e força aponam para denro ao longo da direção radial.

-TESTE 2

Quando você anda de roda-gigante com velocidade constante, que são as direções da sua

aceleração ã e da força normal FN exercida sobre você pelo ssento (que está sempre na vertical) quando você passa (a) pelo ponto mais alto e (b) pelo ponto mais baixo da roda?

Exemplo

Diavolo executa um /oop vertical

Em 1901, em um espetáculo de circo, Allo "Dare Devi!" po livre da Fig. 6-9b. A força raviacional g aponta para Diavolo apresentou pela primeira vez um número de acro baixo ao longo do eixo y; o mesmo acontece com a força bacia que consisia em descrever um loop verical peda normal .' exercida pelo loop sobre a pícula. A segunda lando uma bicicleta (Fig. 6-9a). Supondo que o loop seja lei de Newton para as componentes y (F ,esy = ma) nos dá um círculo de raio R

y

= 2,7 m, qual é a menor velocidade

v que Diavolo podia ter na parte mais alta do loop para

-FN - F1 = n1(-a)

permanecer em contato com a pista?

e

-P

m(-f).

N - mg =

(6-19)

IDEIA-CHAVE

Se a partícula possui a menor velociae v necessária para

Podemos supor que Diavolo e sua biciclea passam pela parte permancr em contato com a pista, está na iminência de mais lta do loop como uma única parícula em movimento peder conato com o loop (cair do loop), o que sigica que circular uniforme. Assim, no alto, a aceleração ã dessa par F N = O no alto do loop (a parícula e o piso se tocam, mas não tícula deve ter módulo a = v2/R dado ela Eq. 6-17 e estar há força normal). Subsituindo F N por O na Eq. 6-19, explicivoltada para baixo, m direção ao cenro do loop circular.

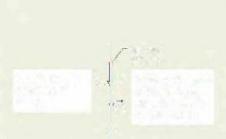
ando v e subsituindo os valores conhecids, obtemos

álculs As forças que agem sobre a parícula quando esá

v = R = V(9,8 m/s2)(2,7 m)

na parte mais ala do loop são mosradas no diarama de cor-

= 5, l n1/s.

(Resposta)

centro do loop.

(b)

(a)

Figua 6-9 (a) Cartaz da época anunciando o número de Diavolo e b) diagrama de corpo livre do artista na parte mais alta do loop. (Fotograia a parte a reproduzia com permissão do Circus World Museum)

Comenários Diavolo sempre se certicava de que sua ve Diavolo e sua biciclea. Mesmo que tivesse se empanturralocidade no alto do loop era maior do que 5, 1 m/s, a veloci do antes de se apresentar, a velocidade mínima necessária dade mínima necessária para não perder contato com o loop para não cair do loop seria os mesmos 5,1 /s.

e cair. Note que essa velocidade não depende da massa de

Exemplo

Carro em uma cuva não compensada

Correndo de cabea para baxo Os caros de corrida mo 3. Como o carro não está derapando, a força de atrito é a denos são projetados de tal forma que o ar em movimento

força de aito estático s (Fig. 6-lOa).

os empurra para baixo, permitindo que façam as curvas em 4. Como o carro se enconra na iminência de derrapar, o alta velocidade sem derrapar. Esta força para baixo é chamódulo s da força de arito é igual ao valor máximo mada de sustentação negativa. Um carro de corrida pode

s,áx = LsFv, onde Fv é o módulo da força normal 'v

ter uma sustentação negativa suficiente para andar de caque a pista exerce sobre o carro.

beça para baixo no teto de uma construção, como fez um

carro ficício no ftlme MIB - Homens de Preto?

álculo para a direção radial A foça de aito , é mosra

A Fig. 6-lOa mostra um carro de corrida de massa da no diagrama de corpo livre da Fig. 6-lOb. Ela aponta no

m = 600 kg se movendo em uma pista plana na forma de sentido negaivo do eixo radial r que se estende do cenro um arco de circunferência de raio R = 100 m. Devido à de curvaura até o carro. A força produz uma aceleração forma do caro e aos aerofólios, o ar que passa exerce so-centrípeta de módulo 2/R. Podemos relacionar a força e bre o carro uma sustentação negaiva F8 dirigida para bai-a aceleração escrevendo a segunda lei de Newton para as xo. O coeiciente de aito estáico entre os pneus e a pista componentes ao longo do eixo r (F,es,r = ma,) na forma é 0,75. (Suponha que as forças sobre os quaro pneus são

iguais.)

*- fr = ln ([illegible]

(6-20)

(a) Se o carro se encontra na iminência de derrapar para Subsituindos pors,mx = μ,,FN temos: fora da curva quando a velocidade escalar é 28,6 /s, qual

é o módulo de .

,

R

srN = 1n (v 2)

s?

D

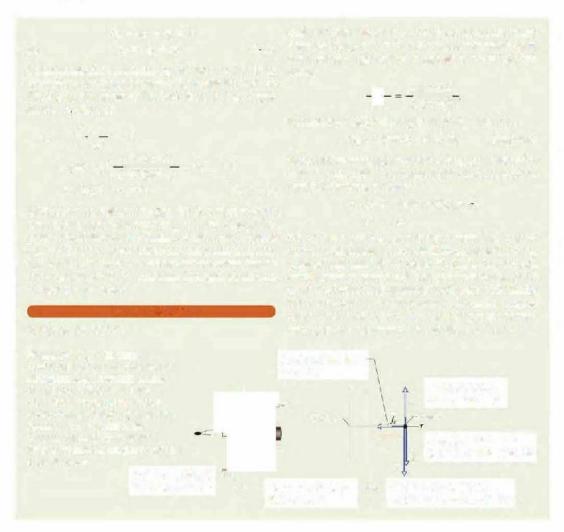
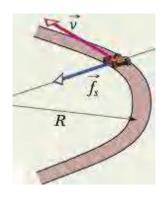
.

(6-21)

I D EIAS-CHAVE

Cálculo para a direção vertial V amos considerar em se1. Como a trajetória do carro é um arco de circunferência, guida as forças vericais que agem sobre o carro. A força ele esá sujeito a uma força cenrípeta; essa força apona normal FN aponta para cima, no senido posiivo do eixo y para o cenro de curvaura do arco (no caso, é uma força da Fig. 6-lOb. A força gravitacional g = mg e a sustentahorizontal).

ção negativa s apontam para baixo. A aceleração do car2. A única força horizontal a que o carro está sujeito é a ro ao longo do eixo y é zero. Assim, podemos escrever a força de arito exercida pela pista sobre os pneus. As segunda lei de Newton para as componentes ao longo do sim, a força cenrípea é uma força de aito.

eixo y (F es,y = may) na forma

Eq. 6-21 e subsituindo na Eq. 6-22. Fazendo isso e expli-

(28.6 m/s)2

citando Fs, obtemos

Fazendo Fs = 663,7 N e explicitando Fs. 0, obtemos

Fs = ,n (:R - g)

Fs, 0 = 6572 N [illegible] 6600 N.

(Resposta)

((28.6 m/s)2

Correndo de cabeça para baxo A força gravitacional é,

= (600 kg) (0,75)(100 - 9,8 m/s2

m)

)

naturalmente, a força a ser vencida para que o carro possa

= 663,7 N " 660 N.

(Resposta) corrr de cabeça para baixo:

b) Como a força de arrasto Eq. 6-14), o módulo F

F8 = mg = (600 kg)(9,8 m/s2)

s da

sustenação negativa do carro é proporcional a 2, o quadra

= 5880 N.

do da velocidade do carro. Assim, a sustentação negativa Com o carro de cabeça para baixo, a sustentação negati

é maior quando o carro está se movendo mais depressa, va é uma força para cima de 6600 N, que excede a força como acontece quando se desloca em um trecho reto da gravitacional para baixo de 5880 N. Assim, um caro de pisa. Qual é o módulo da sustenação negativa para uma corrida pode se sustentar de cabeça para baixo contanto velocidade de 90 m/s?

que sua velocidade seja da ordem de 90 s (= 324 kmh).

Entretanto, como andar nesta velocidade é muito perigoso

IDEIA-CHAVE

mesmo em uma pista reta e com o carro na posição normal,

Fs é proporcional a v2.

não espere ver este ruque realizado fora do cinema

Figua 6-10 (a) Um carro de

Atrito: aponta para

corrida descreve uma curva em uma

o centro

pisa plana com velocidade escalar

constante v. A força centípeta

y

A força normal

-

necessária para que o carro faça a

(a)

Diagrama de corpo (b) Sustentação negativa:

livre do carro

empurra o carro para baixo

Exemplo

Carro em uma cuva compensada

As curvas das rodovias costumam ser compensadas (in Se a força de arito exercida pelo piso é desprezível, qual clinadas) para evitar que os carros derrapem. Quando a é o menor valor do ângulo de elevação } para o qual o estrada está seca, a força de atrito entre os pneus e o piso carro não derrapa?

é suficiente para eviar derrapagens, mesmo sem compensação. Quando a pista está molhada, porém, a força de IDEIAS-CHAVE

arito diminui muito e a compensação se torna essencial. Ao conrário do que acontece no exemplo anterior, a pis

A Fig. 6-1 la mosra um caro de massa m que se move ta possui uma inclinação para que a força normal 'v que com uma velocidade escalar constante v de 20 m/s em age sobre o carro tenha uma componente na direção do uma pista circular compensada com R = 190 m de raio. centro da curva (Fig. 6-1 lb). Assim, Fv possui agora uma (Trata-se de um carro normal e não de um carro de corri componente centrípeta, de módulo F v,, na direção radial r.

da, o que signiica que não existe sustentação negativa.) Queremos calcular o valor do ângulo de inclinação } para

para as componentes ao longo do eixo y (ss = m,) as

álculo na eção radial Como mostra a Fig. 6-1 lb (e o sume a seguinte forma:

leitor pode veriicar), o ângulo que a força FN faz com a

verical é igual ao ângulo de inclinação } da pista. Assim,

FN cos J - nig = rn(O),

a componente radial F Nr é igual a F

donde

N sen } e a segunda lei

de Newton para as componentes ao longo do eixo r (F es,, =

(6-24)

*a,) assume a seguinte forma: ([illegible]

Combinaão dos resutados A Eq. 6-24 também contém

as incógnitas F N e m, mas observe que, dividindo a Eq.

- Fv sen } = nz

(6-23) 6-23 pela Eq. 6-24, eliminamos as duas incógnitas. Procedendo desta forma, subsituindo (sen 0)/(cos }) por tan Não podemos obter o valor de } usando apenas esta equa } e explicitando}, obtemos

ção porque ela também contém as incógnitas F N e m.

vi

8 = lan-1 -

álculo na direção erical V amos considerar as forças e

J

Caro

l--

[illegible]

a

-

Diagrama de

F

A força gravitacional

i

corpo livre do

puxa o carro para

carro

baixo.

(a)

(b)

Figura 6-1 1 (a) Um carro faz uma curva compensada com velocidade escalar constane v. O ângulo de inclinação está exagerado para maior clareza. (b) Diagrama de corpo livre do carro, supondo que o arito entre os pneus e a estrada é nulo e que o carro não possui sustenação negativa. A componente radial F N, da força normal (ao longo do eixo radial r) fonece a força cenrípeta e a aceleração radial necessárias.

1

REVISÃO E RESUMO

1

Atrito Quando uma força F tende a fazer um corpo deslizar em

força normal. Se a componente de F paalela à superfície excede

uma superfície, a superfície exerce uma força de atrito sobre o

o valor de s.1,., o corpo começa a se mover.

corpo. A força de arito é paralela à superfície e está orienada de 3. Se o corpo começa a se mover, o módulo da força de atrito modo a se opor ao movimento. Esa força se deve às ligações entre

diminui rapidamente para um valor constante i dado por

os átomos do corpo e os átomos da superfície.

Se o corpo permanece imóvel, a foça de arito é a força de

Ík = lk F ,-J,

(6-2)

atrito estáico J,. §e o corpo se move, a foça de atrito é a força

onde ,k é o coeficiente de atrito cinético.

de atrito cinético Ík·

Força de Arrasto Quando há movimento relativo enre o ar (ou

1. Se um corpo permanece imóvel, a força de atrito estático , e outro luido qualquer) e um corpo, o corpo sofre a ação de uma a componente de F paralela à superície têm módulos iuais e força de arrasto D que se opõe ao movimento relativo e aponta sentidos opostos. Se a componente de F aumenta, , também na direção em que o fluido se move em relação ao corpo. O móaumenta.

velocidade terminal v, dada por

dado por

∴

*V = [illegible]

(6-16)

(6-18)

1

Movimento Circular Unifonne Se uma partícula se move em onde m é a massa da partícula. As grandezas vetoriais ã e F aponam uma circunferência ou em um arco de circunferência de raio R com para o cenro de curvatura da rajetória da partícula.

P E R G U N T A S

1 Na Fig. 6 -12, se a caixa está parada e o ânulo J enre a hoizontal Uma força F, dirigida para cima ao longo da rampa, é aplicada ao e a força F aumena, as grandezas a seguir aumentam, diminuem ou bloco e o módulo da força aumentado gradualmente a partir de zero.

permanecem com o mesmo valor: (a) F,; (b),; (c) FN; (d)f,.,d,? (e) Durante esse aumento, o que acontece com a direção e o módulo da Se a caixa está em movimento e J aumenta, o módulo da força de força de atrito que age sobre o bloco?

atrito a que a caixa está submetida aumenta, diminui ou permanece

-

o mesmo?

F

/

Figura 6-14 Pergunta 6.

\9

Figura 6-12 Pergunta 1.

7 Responda à Pergunta 6 se a força F esiver orientada para baixo

2 Repita a Pergunta 1 para o caso de a força F esar orientada para ao longo da rampa. Quando o módulo de F aumenta a partir de zero, cima e não para baixo, como na Fig. 6-12.

o que acontece com a direção e o módulo da força de atrito que age

3 Na Fig. 6-13, uma força horizontal i de módulo 1 O N é aplicada a sobre o bloco?

uma caixa que está sobre um piso, mas a caixa não se move. Quando 8 Na Fig. 6-15, uma força horizonal de 100 N vai ser aplicada a o módulo da força vertical ' 2 aumenta a partir de zero, as grande uma prancha de 10 kg, que está inicialmente em repouso sobre um zas a seuir aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas: (a) piso liso sem atrito, para acelerar a prancha. Um bloco de 10 kg o módulo da força de arito estático , a que a caixa está submetida; repousa na superície da prancha; o coeiciente de arito , enre o (b) o módulo da força normal FN exercida pelo piso sobre a caixa; bloco e a prancha não é conhecido e o bloco está solto, podendo e s

(c) o valor máximo s.má, do módulo da força de atrito estático a que corregar sobre a prancha. (a) Considerando essa possibilidade, qual a caixa está submetida? (d) A caixa acaba escorregando? -

é o intervalo de valores possíveis para o módulo aPda aceleração da

prancha? (Sugestão: não é preciso fazer nenhum cálculo complicai

-->

do; basta considerar valores extremos de µ.) (b) Qual é o intervalo

•

. de valores possíveis para o módulo ab da aceleração do bloco?

Figura 6-13 Pergunta 3.

o

Bloco

Pancha!

tO N

4 Em três experimentos, rês forças horizontais diferentes são apl i cadas ao mesmo bloco que está sobre a mesma bancada. Os módulos das forças são F

Figura 6.1 5 Per

***1* = 12 N, F *2* = 8 N e F *3* = 4 N. Em cada experiunta 8.**

mento, o bloco permanece estacionário, mesmo com a aplicação da

força. Ordene as forças, em ordem decrescente, de acordo (a) com 9 A Fig. 6-16 mostra a rajetória de um carinho de parque de divero módulof, da força de arito estático que a bancada exerce sobre o sões que passa, com velocidade escalar constante, por cinco arcos bloco e (b) com o valor máximo f, '"''

'

dessa força.

circulares de raios *R0,* 2R0 e *3R0*• Ordene os arcos de acordo com o 5 Se você pressiona um caixote de maçãs contra uma parede com módulo da força centrípeta que age sobre o carrinho ao passar por tanta força que

o caixote não escorrega parede abaixo, qual é a eles, começando pelo maior.

orientação (a) da força de atrito estático *J,* que a parede exerce sobre o caixote e (b) da força normal FN que a parede exerce sobre o 2

caixote? Se empurra o caixote com mais força, o que acontece (c)

3

5

com,, (d) com FN e (e) com,_mx?

I

4

6 Na Fig. 6-14, um bloco de massa *m* é mantido estacionário sobre

uma rampa pela força de atrito que a rampa exerce sobre o bloco. Figura 6.16 Perunta 9.

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - li

10

Em 1987, para comemorar o dia de Halloween, dois 1 1 Uma pessoa que esá andado de roda-gigante passa pelas s e paraquedistas trocaram uma

abóbora entre si enquanto estavam em guintes posições: (1) o ponto mais alto da roda, (2) o ponto mais queda livre, a oeste de Chicago. A brincadeira foi muito divertida até baixo da roda; (3) o ponto médio da roda. Se a roda está girando com que o homem que esava com a abóbora abiu o paraquedas. A abóbora velocidade angular constante, ordene as três posições, em ordem foi arancada de suas mãos, despencou 0,5 m, aavessou o telhado de decrescente, de acordo (a) com o módulo da aceleração cenrípeta uma casa, bateu no chão da cozinha e se espalhou por toda a cozinha da pessoa; (b) com o módulo da força centrípeta resulante a que recém-reformada. O que fez o paraquedisa deixar cair a abóbora, do a pessoa está sujeita e (c) com o módulo da força normal a que a ponto de vista do paraquedista e do ponto de visa da abóbra?

pessoa está sujeita.

P R O B L E M A S

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

-

Informações adicionais disponívei s em O *Circo Voador da Física* de Jeart Wal ker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 6-3 Propriedades do Atrito

•B

- *As misteriosas pedras que migram.* Na remoa Racetrack

•1 O piso de um vagão de trem está carregado de caixas soltas Playa, no V ale da Morte, Califóia, as pedras às vezes deixam rascujo coeiciente de arito esático com o piso é 0,25. Se o rem está tros no chão do deserto, como se esivessem migrando (Fig. 6 -18).

se movendo inicialmente com uma velocidade de 48 km/h, qual é Há muitos anos que os cientistas tentam explicar como as pedras se a menor disância na qual o trem pode ser parado com aceleração movem. Uma

possível explicação é que, durante uma tempestade constante sem que as caixas deslizem no piso?

ocasional, os fortes ventos arrastam as pedras no solo amolecido

•2 Em um jogo de *shueboard* improvisado, estudantes enlou pela chuva. Quando o solo seca, os rasros deixados pelas pedras quecidos pelos exames inais usam uma vassoura para movimentar são endurecidos pelo calor. Seundo medições realizadas no local, um livro de cálculo no corredor do dormitório. Se o livro de 3,5 kg o coeiciente de atrito cinético entre as pedras e o solo úmido do adquire uma velocidade de 1,60 m/s ao ser empurrado pela vassou deserto é aproximadamente 0,80. Qual é a força horizontal necesra, a partir do repouso, com uma força horizontal de 25 N, por uma sária para manter em movimento uma pedra de 20 kg (uma massa distância de 0,90 m, qual é o coeiciente de atrito cinético enre o típica) depois que uma rajada de vento a coloca em movimento? (A livro e o piso?

história continua no Problema 37.)

•3 Uma cômoda com uma massa de 45 kg, incluindo s gavetas

e as roupas, está em repouso sobre o piso. (a) Se o coeiciente de

atrito esático enre a cômoda e o piso é 0,45, qual é o módulo da

menor força horizontal necessária para fazer a cômoda entrar em

movimento? (b) Se as gavetas e as roupas, com uma massa toal de

17 kg, são removidas antes de empurrar a cômoda, qual é o novo

módulo mnimo?

•4 Um poro brincalhão escorrega em uma rampa com uma inclina

ção de 35º e leva o dobro do tempo que levia se não houvesse arito.

Qual é o coeiciente de arito cinéico entre o porco e a rampa?

•5 Um bloco de 2,5 kg está inicialmente em repouso em uma superfície horizontal. Uma força horizonal P de módulo 6,0 N e uma força vertical P são aplicadas ao bloco (Fig. 6-17). Os coeicientes

de arito entre o bloco e a superfície são ,, = 0,40 e *μ,k* = 0,25.

Determine o módulo da força de arito que age sobre o bloco se o Figura 6-18 Problema 8. O que fez a pedra se mover? *(Jery* módulo de P é (a) 8,0 N, (b) 10 N e (c) 12 N.

Schad/Photo Researchers)

•9 Um bloco d: 3,5 kg é empurrado ao longo de um piso horizontal

p

-

por uma força *F* de módulo 15 N que faz um ângulo *J* = 40º com

***F* -**

a horizontal (Fiura 6-19). O coeiciente de arito cinético enre o

bloco e o piso é 0,25. Calcule (a) o módulo da força de atrito que o

Figura 6-17 Problema 5.

l

• piso exerce sobre o bloco e (b) o módulo da aceleração do bloco.

•6 Um jogador de beisebol de massa *m* = 79 kg, deslizando para

chegar à segunda base, é retardado por uma força de atrito de módulo 470 N. Qual é o coeiciente de atrito cinéico μk entre o jogador

-

e o chão?

Figura 6-19 Problemas 9 e 32.

F

•7 Uma pessoa empurra horizontalmente um caixote de 55 kg com

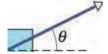
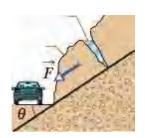
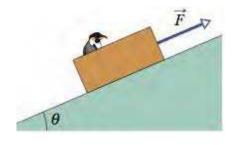
uma força de 220 N para deslocá-lo em um piso plano. O coeficiente •10 A Fig. 6-20 mostra um bloco inicialmente estacionário de de arito cinético é 0,35. (a) Qual é o módulo da força de atrito? (b) massa *m* sobre um piso. Uma força de módulo 0,500 *mg* é aplicada Qual é o módulo da aceleração do caixote?

com um ângulo *J* = 20° para cima. Qual é o módulo da aceleração

y
x

θ

$\vec{F}$
θ

$\vec{F}$
θ

do bloco se (a) μ, = 0,600 e μk = 0,500 e (b) μ, = 0,400 e μ, = plano de esratiicação é 24º e o coeiciente de atrito estático enre 0,300?

- o bloco e o plano é 0,63. (a) Mosre que o bloco não desliza. (b) A

áua penetra na junta e se expande após congelar, exercendo sobre

F

o bloco uma força *F* paralela a *A* 1• Qual é o valor mínimo do módulo *F* da força para o qual ocorre um deslizamento?

Figura 6-20 Problema 10.

Juna con1 gelo

B

A'

•11 Um caixote de 68 kg é arrastado sobre um piso, puxado por

uma corda inclinada 15º acima da horizontal. (a) Se o coeficiente

de arito estático é 0,50, qual é o valor mínimo do módulo da força

para que o caixote comece a se mover? (b) Se μ, = 0,35, qual é o

A

módulo da aceleração inicial do caixote?

Figura 6-22 Problema 14.

•12 Por vola de 1915, Henry Sincosky, da Filadéli, pendurou-se

no caibro de um telhado apertando-o com os polegares de um lado • 15 O coeiciente de atrito esático enre o Te.on e ovos mexidos e os ouros dedos do ouro lado (Fig. 6-21). A massa de Sincosky é cerca de 0,04. Qual é o menor ângulo com a horizontal que faz era 79 kg. Se o coeiciente de atrito estático entre as mãos e o caibro com que os ovos deslizem no fundo de uma frigideira revestida com era 0,70, qual foi, no mnimo, o módulo da força normal exercida Te.on?

sobre o caibro pelos polegares ou os dedos do lado oposto? (Depois • • 16 Um trenó com um pinguim, pesando 80 N, esá em repouso de se pendurar, Sincosky ergueu o corpo e deslocou-se ao longo do sobre uma ladeira de ânulo) = 20º com a horizontal (Fig. 6-23).

caibro, trocando de mão. Se você não dá valor ao feito de Sincosky, Entre o trenó e a ladeira, o coeiciente de arito estático é 0,25 e o tente repetir a proeza.)

coeiciente de atrito cinético é 0,15. (a) Qual é o menor módulo da

força *P*, paralela ao plano, que impede o trenó de deslizar ladeira

abaixo? (b) Qual é o menor módulo *F* que faz o trenó começar a subir a ladeira? (c) Qual é o valor de *F* que faz o renó subir a ladeira com velocidade constante?

Figura 6-23 Problemas 16 e 22.

• • 17 Na Fig. 6-24, uma força P atua sobre um bloco com 45 N de

peso. O bloco está inicialmente em repouso sobre um plano inclinado de ânulo) = 15º com a horizontal. O senido positivo do eixo *x* é para cima ao longo do plano. Os coeicientes de arito entre o

Figua 6-21 Problema 12.

bloco e o plano são µ,, = 0,50 e µ,k = 0,34. Em termos dos vetores

unitários, qual é a força de arito exercida pelo plano sobre o blco

quando *Pé* igual a (a) (-5,0 N)i, (b) (-8,0 N)i e (c) (- 15,0 N)i?

•13 Um operário empurra um engradado de 35 kg com uma força

horizontal de módulo 110 N. O coeiciene de arito estático entre

o enradado e o piso é 0,37. (a) Qual é o valor de

X

,_111,, nessas circunstâncias? (b) O engradado se move? (c) Qual é a força de atrito que o piso exerce sobre o engradado? (d) Suponha que um segundo Figura 6-24 Problema 17.

operário, no intuito de ajudar, puxe o engradado para cima. Qual é

o menor puxão vertical que permite ao primeiro operário mover o ••18 Você depõe como perito em um caso envolvendo um acienradado com o empurrão de 110 N? (e) Se, em vez disso, o se dente no qual um carro *A* bateu na raseira de um carro *B* que esundo operário tenta ajudar puxando horizontalmente o engradado, tava parado em um sinal vermelho no meio de uma ladeira (Fig.

qual é o menor puxão que coloca o engradado em movimento?

6-25). Você descobre que a inclinação da ladeira *é)* = 12,0º, que

•14 A Fig. 6-22 mostra a seção ransversal de uma estrada na en os carros estavam separados por uma distância *d* = 24,0 m quando costa de uma montanha . A rea *A'* represena um plano de esra o motorisa do carro *A* reou bruscamente, bloqueando as rodas (o tiicação ao longo do qual pode ocorrer um deslizamento. O bloco carro não dispunha de freios BS), e que a velocidade do carro *A*

B, **situado acima da esrada, está separado do resto da montanha no momento em que o motorista pisou no reio era *v0* = 18 m/s.**

por uma grande fenda (chamada *junta),* de modo que somente o Com que velocidade o carro *A* bateu no carro *B* se o coeiciente de atrito enre o bloco e o plano de estratiicação evita o deslizamen atrito cinético era (a) 0,60 (estrada seca) e (b) 0,10 (esrada coberta to. A massa do bloco é 1,8 X 107 kg, o *ângulo de mergulho)* do de folhas molhadas)?

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - li

l

3

Figua 6-25 Problema 18.

Figura 6-29 Problema 23.

••19 Uma força hozontal *F* de 12 N empurra um bloco de 5,0 ••24 Um bloco de 4,10 kg é empurrado sobre um piso por uma N de peso conra uma parede vertical (Fig. 6-26). O coeiciente força horizontal constante de módulo 40,0 N. A Fig. 6-30 mosra de atrito estático entre a parede e o bloco é 0,60 e o coeficiente de a velocidade *v* do bloco em função do tempo t quando o bloco se atrito cinético é 0,40. Suponha que o bloco não esteja se movendo desloca sobre o piso ao longo de um eixo *x.* A escala vertical do inicialmente. (a) O bloco vai se mover? (b) Qual é a força que a gráico é deinida por *v,* = 5,0 m/s. Qual é o coeiciente de atrito parede exerce sobre o bloco em termos dos vetores unirios?

cinético entre o bloco e o piso?

y

F

----- - -*x*

Figura 6-26 Problema 19.

o

••20 Na Fig. 6-27, uma caixa de cereais Cheerios (massa m

0,5

1,0

e =

Figura 6-30 Problema 24.

t (s)

1,0 kg) e uma caixa de cereais Wheaties (massa mw = 3,0 kg) são

aceleradas sobre uma superfície horizonal por uma força horizontal

***F* aplicada à caixa de cereal Cheerios. O módulo da força de atrito • • 25 O bloco B da Fig. 6-31 pesa 711 N. O coeiciente de atrito que age sobre a caixa de Cheerios é 2,0 N e o módulo da força de estático enre o bloco e a mesa é 0,25; o ângulo J é 30º; suponha atrito que age sobre a caixa de Wheaties é 4,0 N. Se o módulo de que o recho da corda entre o bloco B e o nó é horizontal. Determi**

***F* é 12 N, qual é o módulo da força que a caixa de Cheerios exerce ne o peso máximo do bloco *A* para o qual o sistema permanece em sobre a caixa de Wheaties?**

repouso.

-

--r>F

Figura 6-27 Problema 20.

B

••21 Uma caixa de arei

A

, inicialmente esacionária, vai ser puxada

em um piso por meio de um cabo no qual a tensão não deve exceder

1100 N. O coeficiente de arito estático entre a caixa e o piso é de

0,35. (a) Qual deve ser o ângulo entre o cabo e a horizontal para que Figura 6-31 Problema 25.

se consiga puxar a maior quantidade possível de areia e (b) qual é

o peso da areia e da caixa nesta situação?

• •26 A Fig. 6-32 mostra rês caixotes sendo empurrados sobre um piso de concreto por ua força horizontal *F* de módulo

••22 Na Fig. 6-23, um trenó é sustentado em um plano inclina 440 N. As massas dos caixotes são m

= 10,0 kg e

do por uma corda que o puxa para cima paralelamente ao plano.

1 = 30,0 kg, *m2*

, = 20,0 kg. O coeiciente de arito cinético entre o piso e cada um

O renó está na iminência de começar a subir. A Fig. 6-28 mosra dos caixotes é de 0,700. (a) Qual é o módulo F

o módulo *F* da força aplicada à corda em função do coeiciente de

32 da força exercida

sobre o bloco 3 pelo bloco 2? (b) Se os caixotes deslizassem sobre

atrito estático µ, entre o renó e o plano. Se *F* =

=

1

2,0 N, *F2* 5,0 N um piso polido, com um coeiciente de arito cinético menor que e µ2 = 0,50, qual é o valor do ângulo J do plano inclinado?

0,700, o módulo F32 seria maior, menor ou igual ao valor quando o

coeiciene de arito era 0,700?

bloco 2 tem massa 2M e o bloco 3 tem massa 2M. Qual qual é a aceleração de *A* se *A* está inicialmente (a) em repouso, (b) é o coeiciente de arito cinético entre o bloco 2 e a mesa?

subindo a rampa e (c) descendo a rampa?

A
θ

C

θ

a_1
μ_{k2}
m_2
m_1
$\mu = 0$
x

Polia ideal

a

----i-----μk

o

[illegible]

B

Figura 6-33 Problemas 27 e 28.

Figura 6-36 Problema 32.

••28 Na Fig. 6-33, dois blocos estão ligados por um io que passa

por uma polia. A massa do bloco *A* é 10 kg e o coeiciente de atri •••33 Um barco de 1000 kg está navegando a 90 h quando o to cinéico entre *A* e a rampa é 0,20. O ângulo *8* da rampa é 30º. motor é desligado. O módulo da foça de arito *h* entre o barco e a O bloco *A* desliza para baixo ao longo da rampa com velocidade áua é propocional à velocidade *v* do barco:; = 70v, onde *v* está constante. Qual é a massa do bloco *B?*

em metros por segundo e Ík em newtons. Determine o tempo necessário para o barco reduzir a velocidade para 45 m/h.

••29 Na Fig. 6-34, os blocos *A* e *B* pesam 44 N e 22 N, respectivamente. (a) Determine o menor peso do bloco *C* que evita que •••34 Na Fig. 6-37, uma prancha demassam1 = 40 kg repousa em o bloco *A* deslize, se μ,, entre *A* e a mesa é 0,20. (b) O bloco *C* é um piso sem atrito e um bloco de massa [illegible] = 1 O kg repousa sobre a removido bruscamente de cima do bloco *A*. Qual é a aceleração do prancha. O coeiciente de atrito esático entre o bloco e a prancha é bloco *A* se ,k entre *A* e a mesa é 0,15?

0,60 e o coeiciente de arito cinético é 0,40. O bloco é puxado por

uma força horizontal F de módulo 100 N. Em termos dos vetores

Polia ideal

unitários, qual é a aceleração (a) do bloco e (b) da prancha?

-

A

***F*--.**

Figura 6-37 Problema 34.

B

•••35 Os dois blocos *(m* = 16 kg e *M* = 88 kg) da Fig. 6-38 não Figura 6-34 Problema 29.

estão ligados. O coeiciente de arito estáico entre os blocos éµ, =

0,38, mas não há arito na superície abaixo do bloco maior. Qual é

• •30 Uma caixa de brinquedos e seu conteúdo têm um peso total o menor valor do módulo da força horizontal *F* para o qual o bloco de 180 N. O coeiciente de arito estático enre a caixa de brinque menor não escorega para baixo ao longo do bloco maior?

dos e o piso é 0,42. A criança da Fig. 6-35 tenta arrastar a caixa

_uxando-a por uma corda. (a) Se *8* = 42º, qual é o módulo da força

m

•• '

- .

_F_ que a criança deve fazer sobre a corda para que a caixa esteja na

_F_ -

iminência de se mover? (b) Escreva uma expressão para o menor

_M_

valor do módulo de _F_ necessário para que a caixa se mova em fun

ção do ânulo _8._ Determine (c) o valor de _8_ para o qual _F_ é mínimo Sem atrito _,_ ' •

e (d) o valor desse módulo mínimo.

Figura 6-38 Problema 35.

Seção 6-4 Força de Arrasto e Velocidade Terminal

•36 A velocidade terminal de um paraquedista é 160 m/h na posição de áuia e 310 km/h na posição de mergulho de cabça. Supondo que o coeiciente de arrasto _C_ do paraquedista não muda de uma posição para oura, determine a razão entre a área da seção reta

efetiva _A_ na posição de menor velocidade e a área na posição de

maior velocidade.

Figura 6-35 Problema 30.

• •37

- _Continuação do Problema 8._ Suponha agora que a Eq.

6-14 foneça o módulo da força de arrasto que age sobre uma pedra

••31 Dois blocos, com 3,6 N e 7,2 N de peso, estão ligados por típica de 20 kg, que apresena ao vento uma área de seção reta veruma corda sem massa e deslizam para baixo em um plano inclina tical de 0,040 m2 e tem um coeiciente de arrasto *C* de 0,80. Tome do de 30º. O coeiciente de arito cinético entre o bloco mais leve e a massa especíica do ar como 1,21 kg/m3 e o coeiciente de atrito o plano é 0,10 e o coeiciente de arito cinético entre o bloco mais cinético como 0,80. (a) Que velocidade *V* de um vento paralelo ao pesado e o plano é 0,20. Supondo que o bloco mais leve desce na solo, em quilômetros por hora, é necessária para manter a pedra em frente, determine (a) o módulo da aceleração dos blocos e (b) a ten movimento depois que com

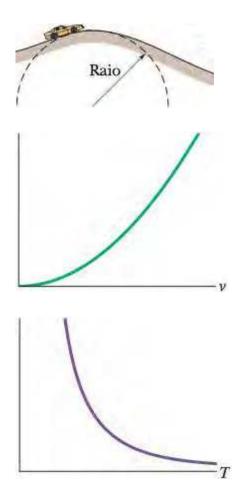
são da corda.

ça a se mover? Como a velocidade do

vento perto do solo é reduzida pela presença do solo, a velocidade

••32 Um bloco é empurrado sobre um piso horizonal por uma do vento informada nos boletins meteorológicos é frequentemente força constante que é aplicada fazendo um ângulo *8* para baixo medida a una altura de 10 m. Suponha que a velocidade do ven

(Fig. 6 -19). A Fig. 6-36 mostra o módulo da aceleração *a* em função to a essa altu.ra seja 2,00 vezes maior que junto ao solo. (b) Para do coeiciente de arito cinético µ, enre o bloco e o piso. Se a1 = a resposta do item a, que velocidade do vento seria informada nos 3,0 m/s2, µ2 = 0,20 e *µk3* = 0,40, qual é o valor de *8?*

boletins meteorológicos? (c) Esse valor é razoável para um vento

de alta velocidade durante uma tempestade? (A história continua ••46 Uma policial de *55,0* kg, que esá perseguindo um suspeito com o Problema 65.)

de carro, faz uma curva circular de 300 m de raio a uma velocidade

••38 Suponha que a Eq. 6-14 foneça a foça de arrasto a que estão escalar consante de 80 h. Determine (a) o módulo e (b) o ângusujeitos um piloto e o assento de ejeção imediaamente após terem lo (em relação à vertical) da força *resultante* que a policial exerce sido ejetados de um avião voando horizontalmente a 1300 m/h. sobre o assento do carro.

(Sugestão: **considere as forças horizontais Suponha ambém que a massa do assento seja i**

e verticais.)

ual à massa do piloto e que o coeiciente de arrasto seja o mesmo que o de um para • •47

- Um viciado em movimentos circulares, com 80 kg de

quedista. Fazendo uma estimativa razoável para a massa do piloto massa, esá andando em uma roda-gigante que descreve uma circune usando o valor apropriado de *v,* da Tabela 6-1, estime o módulo ferência verical de 1 O m de raio a uma velocidade escalar constante (a) da força de arrasto sobre o conjunto *piloto* + *assento* e (b) da de 6,1 /s. (a) Qual é o período do movimento? Qual é o módulo desaceleração horizontal (em termos de g) do conjunto, ambos ime da força normal exercida pelo assento sobre o viciado quando a m diatamente após a ejeção. [O resultado do item (a) deve servir de bos passam (b) pelo ponto mais alto da rajetória circular e (c) pelo alera para os projetistas: o assento precisa dispor de um anteparo ponto mais baixo?

para desviar o vento da cabeça do piloto.]

• •48

- Um carro de montanha-russa tem uma massa de

• •39 Calcule a razão enre a força de arasto experimentada por um 1200 kg quando está lotado. Quando o carro passa pelo alto de uma avião a jato voando a 1000 km/h a uma altitude de 10 km e a força elevação circular com 18 m de raio, a velocidade escalar se mantém de arrasto experimentada por um avião a hélice voando a metade consante. Nesse instante, quais são (a) o módulo FN e (b) o sentida altitude com metade da velocidade. A massa especíica do ar é do (para cima ou para baixo) da força normal exercida pelo trilho 0,38 kg/m3 a 10 km e 0,67 kg/m3 a 5,0 km. Suponha que os aviões sobre o carro se a velocidade do carro é *v* = 1 1 /s? Quais são (c) possuem a mesma área de seção reta efeiva e o mesmo coeficiente FN e (d) o senido da força normal se v = 14 /s?

de arrasto C.

••49 Na Fig. 6-39, um carro passa com velocidade constante por

••40

- Ao descer uma encosta, um esquiador é reado pela uma colina circular e por um vale circular de mesmo raio. No alto força de arrasto que o ar exerce sobre o seu corpo e pela força de da colina, a força normal execida sobre o motorista pelo assento do atrito cinético que a neve exerce sobre os esquis. (a) Suponha que carro é zero. A massa do motorista é de 70,0 kg. Qual é o módulo o ânulo da encosta é *J* = 40,0°, que a neve é neve seca, com um da força normal exercida pelo assento sobre o motorisa quando o coeiciente de arito cinéico ,k = 0,0400, que a massa do esquia carro passa pelo fundo do vale?

dor e seu equipamento é *m* = 85,0 kg, que a área da seção reta do

esquiador (agachado) é *A* = 1,30 m2, que o coeficiente de arasto é

1

aio

1 1

***C* = 0,150 e que a massa especíica do ar é 1,20 kg/m3**

1

• (a) Qual é a

\

1

\

I

velocidade terminal? (b) Se o esquiador pode fazer o coeficiente de

' '

/

'

/

/

arrasto *C* sofrer uma pequena variação *dC* alterando, por exemplo, a posição das mãos, qual é a variação correspondente da velocidade

terminal?

Figura 6-39 Problema 49.

São 6-5 Movimento Cirular Uniforme

••50 Um passageiro de 85,0 kg descreve uma trajetória circular

•41 Um gato está cochilando em um carrossel parado, a uma dis de raio *r* = 3,50 m em movimento circular uniforme. (a) A Fig.

tância de 5,4 m do cenro. O brinquedo é ligado e logo atinge a ve *6-40a* mosra um gráico do módulo *F* da força centrípeta em função locidade normal de funcionamento, na qual completa uma volta a da velocidade *v* do passageiro. Qual é a inclinação do gráico para cada 6,0 s. Qual deve ser, no mínimo, o coeiciente de arito estátiv = 8,30 /s? (b) A Fig. *6-40b* mosra um gráico do módulo *F* da co entre o gato e o carrossel para que o gato permaneça no mesmo força em função de T, o período do movimento. Qual é a inclinação lugar, sem escorregar?

do grico para T = 2,50 s?

•42 Suponha que o coeiciente de atrito estático entre a esrada

e os pneus de um carro é 0,60 e não há sustentação negativa. Que

F

F

velocidade deixa o carro na iminência de derapar quando faz uma

curva não compensada com 30,5 m de raio?

•43 Qual é o menor raio de uma curva sem compensação (plana)

que permite que um ciclista a 29 km/h faça a curva sem derrapar se

o coeficiente de atrito estático entre os pneus e a pisa é 0,32?

•44 Durante uma corrida de renós nas Olimpíadas de Inveno, a

equipe jamaicana fez uma curva de 7 ,6 m de raio a uma velocidade

de 96,6 k/h. Qual foi a aceleração em unidades de

(a)

(b)

g?

••45

- Um estudante que pesa 667 N está sentado, com Figura 6-40 Problema 50.

as costas eretas, em uma roda-gigante em movimento. No ponto mais alto, o módulo da força normal FN exercida pelo assento ••51 Um avião está voando em uma circunferência horizontal com sobre o estudante é 556 N . (a) O estudante se sente mais leve ou uma velocidade de 480 km/h (Fig. 6-41). Se as asas estão inclinadas mais pesado neste ponto? (b) Qual é o módulo de FN no ponto de um ânulo *J* = 40º com a horizonal, qual é o raio da circunfemais baixo? Se a velocidade da roda-

gigante é duplicada, qual é o rência? Suponha que a força necessária para manter o avião nessa módulo FN da força normal (c) no ponto mais alto e (d) no ponto trajetória resulte inteiramente de uma "sustentação aerodinâmica"

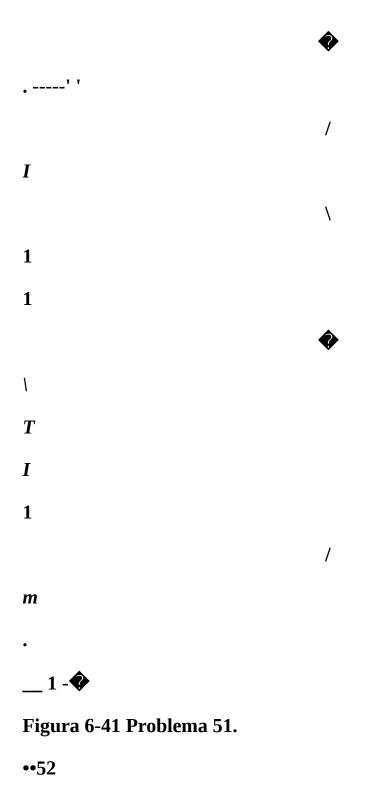
mais baixo?

perpendicular à superfície das asas.

por um io que passa por um furo no cenro da mesa (Fig. 6-43).

Que velocidade do disco mantém o cilindro em repouso?

Figura 6-41 Problema 51.

••52

Em um brinquedo de parque de diversão, um carro se

move em uma circunferência vertical na extremidade de una haste
Figura 6-43 Problema 57.

rígida de massa desprezível. O peso do carro com os passageiros

é 5,0 kN e o raio da circunferência é 10 n. No ponto mais alto da ••58 _ *Frear ou desviar?* A Fig. 6-44 mostra uma vista sucircunferência, quais são (a) o módulo *F1e* (b) o sentido (para cima perior de um carro que se aproxima de um muro. Suponha que o ou para baixo) da força exercida pela haste sobre o caro se a velomotorista começa a rear quando a distância entre o caro e o muro cidade do carro é *v* = 5,0 *ls?* Quais são (c) *F*1 e (d) o sentido se é *d* = 107 m, que a massa do carro é *m* = 1400 kg, que a velocida

***V* = 12 m/s?**

de inicial é *v0* = 35 m/s e que o coeiciente de arito estáico éµ, =

••53 Um bonde antigo dobra una esquina fazendo una curva 0,50. Suponha também que o peso do carro está distribuído igualplana com 9,1 m de raio a 16 km/h. Qual é o ângulo que as alças de mente pelas quaro rodas, mesmo durante a renagem. (a) Qual é o mão penduradas no teto fazem com a vertical?

valor mínimo do módulo do arito esático (enre os pneus e o piso)

••54 _ - Ao projetar brinquedos para parques de diversão que para que o carro pare antes de se chocar com o muro? (b) Qual é o fazem movimentos circulares, os engenheiros mecânicos devem valor máximo possível do atrito estático s.má,? (c) Se o coeiciente levar em conta o fato de que pequenas variações de certos parâmede arito cinético entre os pneus (com as rodas bloqueadas) e o piso os podem alterar siniicativamente a força experimentada pelos é ,k = 0,40, com que velocidade o carro se choca com o muro? O

passageiros. Considere um passageiro de massa *m* que descreve ua motorista também pode tentar se desviar do muro, como mostra a ajetória circular de raio *r* com velocidade *v.* Determine a variação igura. (d) Qual é o módulo da força de atrito necessária para fazer *dF* do módulo da força para (a) una variação do raio *r* d a rajetó o carro descrever uma trajetória circular de raio *d* e velocidade *v0?*

ria, sem que *v* varie; (b) uma variação *dv* da velocidade, sem quer (e) A força calculada no item (d) é menor que,,máx, o que evitaria varie; (c) uma variação *dT* do período, sem que r varie.

o choque?

••55 Um parafuso esá enroscado em uma das exremidades de

uma haste ina horizonal que gira em tomo da outra exremidade.

1 1

Um engenheiro monitora o movimento iluminando o parafuso e a

1 J

haste com una lâmpada estroboscópica e ajustando a frequência

I

I

dos lampejos até que o parafuso pareça estar nas mesmas oito po

Trajetória

1

1

sições a cada rotação completa da haste (Fig. 6-42). A requência

do carro

,/

–

–

_

,' ----

dos lampejos é 2000 lashes por segundo; a massa do parafuso é 30 g e a haste tem 3,5 cm de comprimento. Qual é o módulo da força exercida pela haste sobre o parafuso?

Figura 6-44 Problema 58.

Muro

Parafuso

• ••59 Na Fig. 6-45, una bola de 1,34 kg é ligada por meio de dois ios de massa desprezível, cada um com comprimento *L* = 1,70 m, a uma haste vertical giratória. Os ios estão amarrados à haste a

Haste

uma disância *d* = 1,70 m um do outro e estão esticados. A tensão do io de cima é 35 N. Determine (a) a tensão do io de baixo; b) o

Posições

módulo da força resultante 's a que esá sujeita a bola; (c) a velo

visíveis

cidade escalar da bola; (d) a dirção de *F*

.. ,.

Figura 6-42 Problema 55.

• •56 Uma curva circular compensada de uma rodovia foi planejada

para uma velocidade de 60 km/h. O raio da curva é 200 m. Em um

f

dia chuvoso, a velocidade dos carros diminui para 40 km/h. Qual

d

é o menor coeiciente de arito entre os pneus e a esrada para que

os carros façam a curva sem derrapar? (Suponha que os carros não

1

possuem sustenação negativa.)

••57 Um disco de metal de massa *m* = 1,50 kg descreve uma cir

Haste giratíria

cunferência de raio *r* = 20,0 cm sobre uma mesa sem arito enquanto

permanece ligado a um cilindro de massa *M* = 2,50 kg pendurado
Figura 6-45 Problema 59.

m_1
m_2
θ

$\vec{F}$
θ

m_1
m_2
θ

θ

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - li

141

Problemas dicionais

60 Na Fig. 6-46, uma caixa com formigas vermelhas (massa total

m1 = 1,65 kg) e uma caixa com formigas pretas (massa total *mi* =

3,30 kg) deslizam para baixo em um plano inclinado, ligadas por

uma haste sem massa paralela ao plano. O ângulo de inclinação é

8 = 30,0º. O coeficiente de arito cinético entre a caixa com form i gas vermelhas e a rampa é µ, 1 = 0,226; entre a caixa com formigas pretas e a rampa é µ2 = O, 113. Calcule (a) a tensão da haste e (b) o

módulo da aceleração comum das duas caixas. (c) Como as respostas dos itens (a) e (b) mudariam se as posições das caixas fossem invertidas?

Figura 6-49 Problema 63.

64 Um vagão de um trem de alta velocidade faz uma curva horizontal de 4 70 m de raio, sem compensação, com velocidade constante.

Os módulos das componentes horizontal e vertical da força que o

vagão exerce sobre um passageiro de 51,0 kg são 210 N e 500 N,

respectivamente. (a) Qual é o módulo da força resulante (de *todas*

as forças) sobre o passageiro? (b) Qual é a velocidade do vagão?

Figura 6-46 Problema 60.

65

***Continuação os Problemas 8 e 37.* Oura explicação**

é que as pedras se movem apenas quando a áua que cai na região

61 Um bloco de massa m. = 4,0 kg é colocado em cima de um durante uma tempestade congela, formando uma ina camada de outro bloco de massa *mh* = 5,0 kg. Para fazer o bloco de cima des gelo. As pedras icam presas no gelo. Quando o vento sopra, o gelo lizar sobre o bloco de baixo enquanto o segundo é mantido ixo, é e as pedras são arrastados e as pedras deixam as trilhas. O módupreciso aplicar ao bloco de cima uma força horizontal de no mínimo lo da força de arrasto do ar sobre esta "vela de gelo" é dado por 12 N. O conjunto de blocos é colocado sobre uma mesa horizon Dgelo = 4Cge1PAge10V2, onde Cgelo é o coeiciente de arrasto (2,0 X

tal sem arito (Fig. 6-47). Determine o módulo (a) da maior força 10·3), pé a massa especíica do ar (1,21 kg/m3), Agelo é a área horihorizontal F que pode ser aplicada ao bloco de baixo sem que os zontal da camada de gelo e *v* a velocidade do vento.

blocos deixem de se mover juntos e (b) a aceleração resultante dos

Suponha o seuinte: a camada de gelo mede 400 m or 50 m

blocos .

por 4,0 mm e tem um coeiciente de arito cinético O, 10 com o solo e

uma massa especica de 917 kg/m3• Suponha ainda que 10 pedras

iuais às do Problema 8 esão presas no gelo. Qual é a velocidade do

ma

-

vento necessária para manter o movimento da camada de gelo (a) nas

proximidades da camada e (b) a uma altura de 1 O m? (c) Esses valores

mb

. *F*

são rzoáveis para ventos fortes durante uma tempestade?

1

•

66 Na Fig. 6-50, o bloco 1, de massa m1 = 2,0 kg, e o bloco 2, de

Figua 6-47 Problema 61.

massa *i* = 3,0 kg, esão ligados por um io de massa desprezível

e são inicialmente manidos em repouso. O bloco 2 está sobre uma

superfície sem arito com uma inclin

62 Uma pedra de 5,00 kg é deslocada em contato com o teto ho

ção 8 = 30 *º* . O coeiciente

de atrito cinéico entre o bloco 1 e a superície horizontal é 0,25. A

rizontal de uma cavena (Fig. 648). Se o coeiciente de atrito ciné polia tem massa e atrito desprezíveis. Ao serem liberados, os blocos tico é 0,65 e a força aplicada à pedra faz um ângulo 8 = 70,0 para entram em movimento. Qual é a tensão do io?

cima com a horizonal, qual deve ser o módulo para que a pedra se

mova com velocidade constante?

Figura 6-50 Problema 66.

Pedra

67 Na Fig. 6-51, um caixote escorrega para baixo em uma vala

Figura 6-48 Problema 62.

inclinada cujos lados fazem um ângulo reto. O coeiciente de atrito

cinético enre o caixote e a vala é µ,k. Qual é a aceleração do caixote

63

- Na Fig. 6-49, uma alpinista de 49 kg está subindo por em termos de ,*'
***8* e *g*?**

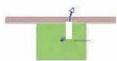
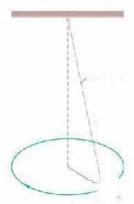
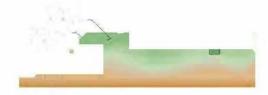
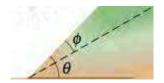
uma "chaminé". O coeiciente de atrito estático entre as botas e

a pedra é 1,2; enre as costas e a pedra é 0,80. A alpinista reduziu a força que está fazendo contra a pedra até que se enconra na iminência de escorregar. (a) Desenhe um diagrama de corpo livre

da moça. (b) Qual é o módulo da força que a moça exerce contra

a pedra? (c) Que fração do peso da moça é sustentada pelo atrito

dos sapatos?

Figura 6-51 Problema 67.

68 ***Projetando uma curva de uma roovia.*** **Se um carro entra mui zar quando é dirigida (a) horizontalmente, (b) para cima, formando to depressa em uma curva, tende a derrapar. No caso de uma curva um ângulo de 60,0º com a horizontal e (c) para baixo, formando compensada com atrito, a força de arito que age sobre um carro em um ângulo de 60,0º com a horizontal.**

ala velocidade se opõe à tendência do carro de derrapar para fora 72 Uma caixa de enlatados escorrega em uma rampa do nível da da

estrada; a força aponta para o lado mais baixo da pista (o lado rua até o subsolo de um armazém com uma aceleração de 0,75 /s2

para o qual a água escoaria). Considere uma curva circular de raio dirigida para baixo ao longo da rampa. A rampa faz um ângulo de

***R* = 200 m e um ângulo de compensação *8*, na qual o coeficiente 40º com a horizontal. Qual é o coeiciente de atrito cinéico enre a de atrito estático enre os pneus e o pavimento é µ,. Um carro (sem caixa e a rampa?**

sustentação negaiva) começa a fazer a curva, como mostra a Fig.

6-11. (a) Escreva uma expressão para a velocidade do carro v

73 Na Fig. 6-54, o coeiciente de arito cinético entre o bloco e o

111,,

que o coloca na iminência de derrapar. (b) Plote, no mesmo gráiplano inclinado é 0,20 e o ângulo *J* é 60º. Quais são (a) o módulo co, v

***a* e (b) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do plano) da**

í, em função de *J* para o intervalo de Oº a 50º, primeiro para

aceleração do bloco se ele está escorregando para baixo? Quais são

***µ,,* = 0,60 (pista seca) e depois para *µ,,* = 0,050 (pista molhada).**

Calcule v

(c) o módulo *a* e (d) o sentido da aceleração se o bloco está escor111x, em *m*/h, para um ângulo de compensação *J* = 10º e para (c)

regando para cima?

***µ,,* = 0,60 e (d)µ, = 0,050. (Agora você pode entender por**

que ocorrem acidentes nas curvas das estradas quando os motoristas

não percebem que a esrada está molhada e continuam dirigindo na

velocidade normal.)

69 Um estudante, enlouquecido pelos exames inais, usa uma for

ça P de módulo 80 N e ângulo *J* = 70º para empurrar um bloco de

5,0 kg no teto do quarto (Fig. 6-52). Se o coeiciente de atrito ci Figura 6-54 Problema 73.

nético enre o bloco e o teto é 0,40, qual é o módulo da aceleração

do bloco?

74 Um disco de metal de 110 g que desliza sobre o gelo é parado

-

em 15 m pela força de arito que o gelo exece sobre o disco. (a) Se

p

a velocidade inicial do disco é 60 /s, qual é o módulo da força de

atrito? (b) Qual é o coeiciente de atrito enre o disco e o gelo?

75 Uma locomotiva acelera um rem de 25 vagões em uma linha

férrea plana. Cada vagão possui uma massa de 5,0 X 104 kg e está

Figura 6-52 Problema 69.

sujeito a uma força de atrito *f* = 250v, onde a velocidade *v* está

em meros por segundo e a forçaf está em newtons. No instante

70 A Fig. 6-53 mostra um *pêndulo cônico,* no qual um peso (pe em que a velocidade do trem é 30 *m*/h, o módulo da aceleração é queno objeto na extremidade inferior da corda) se move em uma 0,20 /s2. (a) Qual é a

tensão no engate entre o primeiro vagão e a circunferência horizontal com velocidade consante. (A corda des locomoiva? (b) Se essa tensão é igual à força máxima que a locomocreve um cone quando o peso gira.) O peso tem uma massa de tiva pode exercer sobre o rem, qual é o maior aclive que a linha fér0,040 kg, a corda tem um comprimento *L* = 0,90 m e a massa des rea pode ter para que a locomotiva consiga puxar o trem a 30 km/h?

prezível e o peso descreve uma circunferência de 0,94 m. Detemine 76 Uma casa é construída no alto de una colina, perto de uma en

(a) a tensão da corda e (b) o período do movimento.

costa com una inclinação *J* = 45º (Fig. 6-55). Um esudo de engenharia indica que o ângulo do declive deve ser reduzido porque as camadas superiores do solo podem deslizar em relação às camadas

inferiores. Se o coeiciente de arito estático entre essas camadas

é 0,5, qual é o menor ângulo p de que a inclinação atual deve ser

reduzida para evitar deslizamentos?

Corda

Noa

inlinação

L

Inlinação

-

/

antiga

Peso

Figura 6-55 Problema 76.

Figura 6-53 Problema 70.

77 Qual é a velocidade terminal de uma bola esférica de 6,00 kg

que possui um raio de 3,0 cm e um coeiciente de arasto de

71 Um bloco de aço de 8,00 kg repousa em uma mesa horizontal. 1,60? A massa especíica do ar no local onde a bola esá caindo é O coeiciente de atrito estático enre o bloco e a mesa é 0,450. Uma 1,20 kg/n3•

força é aplicada ao bloco. Calcule, com três algarismos signiicati 78 Uma esudante pretende determinar os coeicientes de atrito esvos, o módulo da força se ela coloca o bloco na iminência de desli-tático e atrito cinético enre uma caixa e uma tábua. Para isso, coloca

PARTE 1

FORÇA E MOVIMENTO - li

13

a caixa sobre a tábua e levanta lentamente uma das extremidades é lubricado, o valor de Oinr aumenta, diminui ou permanece inalteda tábua. Quando o ângulo de inclinação em relação à horizontal rado? (d) Qual é o valor de Oinr para μ, = 0,60?

chega a 30°, a caixa começa a escorregar e percorre 2,5 m ao longo

da tábua em 4,0 s, com aceleração consante. Quais são (a) o coei

y

ciente de atrito estáico e (b) o coeficiente de arito cinético entre a

caixa e a ábua?

"==x

79 O bloco *A* da Fig. 6-56 possui massa m" = 4,0 kg e o bloco *B*

possui massa

Figura 6-58

***mn* = 2,0 kg. O coeiciente de atrito cinético enre o**

Problema 84.

bloco *B* e o plano horizontal é ,k = 0,50. O ângulo do plano inclin a do sem atrito *é)* = 30º. A polia serve apenas para mudar a direção 85 Durante a tarde, um carro é estacionado em uma ladeira que faz do fio que liga os blocos. O fio possui massa desprezível. Determine um ângulo de 35,0º com a horizontal. Nesse momento, o coeiciente (a) a tensão do fio e (b) o módulo da aceleração dos blocos.

de atrito estático enre os pneus e o asfalto é 0,725. Quando anoitece,

começa a nevar e o coeiciente de atrito diminui, tanto por causa da

Polia ideal

neve como por causa das mudanças químicas do pavimento causa

B

das pela queda de temperatura. Qual deve ser a redução percenual

do coeficiente de arito para que o carro comece a escorregar ladeira

abaixo?

86 _ Um menino com uma funda coloca uma pedra (0,250

Figura 6-56 Problema 79.

kg) na bolsa (0,010 kg) da funda e faz girar a pedra e a bolsa em

uma circunferência vertical de raio 0,650 m. A corda enre a bolsa

e a mão do menino tem massa desprezível e arrebentará se a tensão

80 Calcule o módulo da força de arrasto a que está sujeito um exceder 33,0 N. Suponha que o menino aumente aos poucos a vemíssil de 53 cm de diâmetro voando a 250 ls em baixa altitude. locidade da pedra. (a) A corda vai arrebentar no ponto mais baixo Suponha que a massa especíica do ar é 1,2 kg/m3 e o coeiciente da circunferência ou no ponto mais alto? (b) Para que valor da vede arrasto *C* é 0,75.

locidade da pedra a corda vai arrebenar?

81 Um ciclista se move em um círculo de 25,0 m de raio com uma 87 Um carro com 10,7 kN de peso, viajando a 13,4 *ls* sem susvelocidade constante de 9,00 *ls.* A massa do conjunto ciclisa-bi tentação negativa, tenta fazer uma curva não compensada com um cicleta é 85,0 kg. Calcule o módulo (a) da força de arito que a pista raio de 61,0 m. (a) Qual é o módulo da força de atrito enre os pneus exerce sobre a bicicleta e (b) da força *resultante* que a pista exerce e a estrada necessária para manter o carro em uma rajetória circusobre a bicicleta.

lar? (b) Se o coeiciente de atrito estático entre os pneus e a estrada

82 Na Fig. 6-57, um carro (sem sustenação negativa), dirigido por é 0,350, o carro consegue fazer a curva sem derrapar?

um dublê, passa pelo alto de um morro cuja seção ransversal pode 88 Na Fig. 6-59, o bloco 1 de massa m1 = 2,0 kg e o bloco 2 de ser aproximada por uma circunferência de raio *R* = 250 m. Qual massa tz = 1,0 kg estão ligados por um fio de massa desprezível.

é a maior velocidade para a qual o carro não perde contato com a O bloco 2 é empurrado por uma força F de módulo 20 N que faz esada no alto do morro?

um ângulo) = 35º com a horizonal. O coeiciente de atrito cinético enre cada bloco e a superfície horizontal é 0,20. Qual é a tensão do io?

/

I

I

1

Figura 6-57 Problema 82.

Figura 6-59 Problema 88.

83 Você precisa empurrar um caixote até um atracadouro. O cai 89 Um pequeno armário com *556* N de peso está em repouso.

xote pesa 165 N. O coeficiente de atrito estático enre o caixote e O coeiciente de arito estático entre o armário e o piso é 0,68 e o o piso é 0,510 e o coeiciente de arito cinético é 0,32. A força que coeiciente de atrito cinético é 0,56. Em quaro diferentes tentativocê exerce sobre o caixote é horizontal. (a) Qual deve ser o módulo vas de deslocá-lo, o armário é empurrado por forças horizonais de da força para que o caixote comece a se mover? (b) Qual deve ser módulos (a) 222 N, (b) 334 N, (c) 445 N e (d) *556* N. Para cada o módulo da força, depois que o caixote começa a se mover, para tentaiva, calcule o módulo da força de atrito exercida pelo piso soque se mova com velocidade constante? (c) Se, depois que o caixote bre o armário. (Em cada tentaiva, o armário está inicialmente em começar a se mover, o módulo da força tiver o valor calculado no repouso.) (e) Em quais das tentativas o armário se move?

item a, qual será o módulo da aceleração do caixote?

90 Na Fig. 6-60, um bloco com 22 N de peso é mantidc: em repouso

84 Na Fig. 6-58, uma força *F é* aplicada a um caixote de massa contra uma parede vertical por uma força horizontal *F* de módulo

***m* que repousa em um piso; o coeiciente de arito estático enre o 60 N. O coeiciente de atrito estático enre a parede e o bloco é 0,55**

caixote e o piso é µ,. O ângulo) é inicialmente Oº, mas é gradual e o coeiciente de arito cinético é 0,38. Em seis experimentos, uma mente aumentado, de modo que a direção da força gira no sentido segunda força P é aplicada ao bloco, paralelamente à parede, com horário. Durante a rotação, a inensidade da força é continuamente os seguintes módulos e sentidos: (a) 34 N para cima, (b) 12 N para ajusada para que o caixote permaneça na iminência de se mover. cima, (c) 48 N para cima, (d) 62 N para cima, (e) 10 N para baixo Para µ, = 0,70, (a) plote a razão *Flmg* em função de) e (b) deter e ()18 N para baixo. Qual é o módulo da força de atrito que age mine o ângulo O,nr para o qual a razão se toma ininia. (c) Se o piso sobre o bloco em cada experimento? Em que experimentos o bloco

se move (g) para cima e (h) para baixo? (i) Em que experimentos a qual é o valor de F? (b) Mostre que se *8* for menor que um certo força de atrito é para baixo?

valor *80,* a força F (ainda orientada ao longo do cabo) será insui

-

ciente para fazer o pano de chão se mover. Determine 80•

F

Figura 6-60 Problema 90.

-

8 F

91 Um bloco escorrega para baixo com velocidade constante em

um plano inclinado de ângulo *8.* Em seguida, o bloco é lançado para

cima no mesmo plano com velocidade inicial v

Figura 6-61 Problema 95.

***0*• (a) Que distância**

o bloco sobe até parar? (b) Depois de parar, o bloco tona a escorregar para baixo? Justifique sua resposta.

96 Uma ciança coloca uma cesta de piquenique na borda de um

92 Uma curva circular em uma rodovia é projetada para uma ve carossel com 4,6 m de raio que dá ua volta completa a cada locidade máxima de 60 km/h. Suponha que os caros não possuem 30 s. (a) Qual é a velocidade de um ponto da borda do carrossel? b) sustentação negativa. (a) Se o raio da curva é 150 m, qual é o ângulo Qual é o menor valor do coeiciente de atrito estático enre a cesta de compensação correto? (b) Se a curva não fosse compensada, qual e o carrossel para que a cesta não saia do lugar?

deveria ser o menor coeiciente de atrito entre os pneus e o piso para 97 Um operário aplica uma força constante de módulo 85 N a uma que os carros não derrapassem ao enrarem na curva a 60 km/h?

caixa de 40 kg que está inicialmente em repouso no piso horizon93 Uma caixa de 1,5 kg está em repouso sobre uma superfície tal de um armazém. Após a caixa ter percorrido uma distância de

-

A

quando, em *t* = O, uma força horizontal *F* = (l,8t)i N (com t em 1,4 m, sua velocidade é 1,0 /s. Qual é o coeiciente de atrito cinésegundos) é aplicada à caixa. A aceleração da caixa em função do tico enre a caixa e o piso?

tempo *t* é dada por ã = O para O : *t* S 2,8 s e ã = (1, 2t -2, 4)i 98 Na Fig. 6-62, um bloco de 5,0 kg se move para cima ao longo

/s2 para $t > 2,8$ s. (a) Qual é o coeficiente de arito estáico entre a de um plano inclinado de ângulo *8* = 37º ao mesmo tempo em que caixa e a superfície? (b) Qual é o coeiciente de atrito cinético entre sofre a ação de uma força horizontal *F* de módulo 50 N. O coeia caixa e a superfície?

ciente de atrito cinético entre o bloco e o plano é 0,30. Quais são

94 Uma criança com 140 N de peso está sentada no alto de um (a) o módulo e (b) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do escorrega que faz um ângulo de 25º com a horizontal. A criança se plano inclinado) da aceleração do bloco? A velocidade inicial do mantém no mesmo lugar segurando os lados do escorrega. Quan bloco é 4,0 *s. (c) Que distância o bloco sobe no plano? (d) D e do sola as mãos, adquire uma aceleração constante de 0,86* s2 pois de atingir o ponto mais alto, o bloco permanece em repouso (dirigida para baixo, naturalmente). Qual é o coeiciente de atrito ou escorrega para baixo?

cinético entre a criança e o escorrega? (b) Que valores máximo e

mínimo do coeiciente de arito esático enre a criança e o escorrega

são compatíveis com as informações do enunciado?

95 Na Fig. 6-61, um faxineiro caprichoso limpa o piso aplicando

ao cabo do esfregão uma força *F.* O cabo faz um ângulo 8 com a

vertical e ., e .*k* são os coeicientes de atrito esático e cinético entre o esfregão e o piso. Ignore a massa do cabo e suponha que toda *e*

a massa m do esregão esá concenrada no pano de chão. (a) Se o

pano de chão se move ao longo do piso com velocidade constante, Figura 6-62 Problema 98.

se move (g) para cima e (h) para baixo? (i) Em que experimentos a qual é o valor de F? (b) Mostre que se *8* for menor que um certo força de atrito é para baixo?

valor *80,* a força F (ainda orientada ao longo do cabo) será insui

-

ciente para fazer o pano de chão se mover. Determine 80•

F

Figura 6-60 Problema 90.

-

8 F

91 Um bloco escorrega para baixo com velocidade constante em

um plano inclinado de ângulo *8.* Em seguida, o bloco é lançado para

cima no mesmo plano com velocidade inicial v

Figura 6-61 Problema 95.

***0*• (a) Que distância**

o bloco sobe até parar? (b) Depois de parar, o bloco tona a escorregar para baixo? Justifique sua resposta.

96 Uma ciança coloca uma cesta de piquenique na borda de um

92 Uma curva circular em uma rodovia é projetada para uma ve carossel com 4,6 m de raio que dá ua volta completa a cada locidade máxima de 60 km/h. Suponha que os caros não possuem 30 s. (a) Qual é a velocidade de um ponto da borda do carrossel? b) sustentação negativa. (a) Se o raio da curva é 150 m, qual é o ângulo Qual é o menor valor do coeiciente de atrito estático enre a cesta de compensação correto? (b) Se a curva não fosse compensada, qual e o carrossel para que a cesta não saia do lugar?

deveria ser o menor coeiciente de atrito entre os pneus e o piso para 97 Um operário aplica uma força constante de módulo 85 N a uma que os carros não derrapassem ao enrarem na curva a 60 km/h?

caixa de 40 kg que está inicialmente em repouso no piso horizon93 Uma caixa de 1,5 kg está em repouso sobre uma superfície tal de um armazém. Após a caixa ter percorrido uma distância de

-

A

quando, em *t* = O, uma força horizontal *F* = (l,8t)i N (com t em 1,4 m, sua velocidade é 1,0 /s. Qual é o coeiciente de atrito cinésegundos) é aplicada à caixa. A aceleração da caixa em função do tico enre a caixa e o piso?

tempo *t* é dada por ã = O para O : *t* S 2,8 s e ã = (1, 2t -2, 4)i 98 Na Fig. 6-62, um bloco de 5,0 kg se move para cima ao longo

/s2 para *t* > 2,8 s. (a) Qual é o coeficiente de arito estáico entre a de um plano inclinado de ângulo *8* = 37º ao mesmo tempo em que caixa e a superfície? (b) Qual é o coeiciente de atrito cinético entre sofre a ação de uma força horizontal *F* de módulo 50 N. O coeia caixa e a superfície?

ciente de atrito cinético entre o bloco e o plano é 0,30. Quais são

94 Uma criança com 140 N de peso está sentada no alto de um (a) o módulo e (b) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do escorrega que faz um ângulo de 25º com a horizontal. A criança se plano inclinado) da aceleração do bloco? A velocidade inicial do mantém no mesmo lugar segurando os lados do escorrega. Quan bloco é 4,0 *s. (c) Que distância o bloco sobe no plano? (d) D e do sola as mãos, adquire uma aceleração constante de 0,86* s2 pois de atingir o ponto mais alto, o bloco permanece em repouso (dirigida para baixo, naturalmente). Qual é o coeiciente de atrito ou escorrega para baixo?

cinético entre a criança e o escorrega? (b) Que valores máximo e

mínimo do coeiciente de arito esático enre a criança e o escorrega

são compatíveis com as informações do enunciado?

95 Na Fig. 6-61, um faxineiro caprichoso limpa o piso aplicando

ao cabo do esfregão uma força *F.* O cabo faz um ângulo 8 com a

vertical e ., e *.k* são os coeicientes de atrito esático e cinético entre o esfregão e o piso. Ignore a massa do cabo e suponha que toda *e*

a massa m do esregão esá concenrada no pano de chão. (a) Se o

pano de chão se move ao longo do piso com velocidade constante, Figura 6-62 Problema 98.

CAPÍTULO
7

145

E N E RG IA C I N ET I CA

E T RA BA L H O

O C U E É FÍSICA?

Um dos objetivos fundamentais da ísica é estudar de perto algo de que se

fala muito hoje em dia: a energia. O tópico é obviamente importante. Na verdade,

nossa civilização depende da obtenção e uso eficiente da energia.

Como todos sabem, nenhum movimento pode ser iniciado sem algum tipo de

energia. Para atravessar o oceano Pacífico a bordo de um avião, precisamos de energia. Para ransportar um computador para o último andar de um ediício ou para uma estação espacial em órbita, precisamos de energia. Para chutar uma bola, precisamos

de energia. Gastamos verdadeiras fortunas para obter e utilizar energia. Guerras foram iniciadas pela disputa de fontes de energia. Guerras foram decididas pelo uso de armas que liberam grandes quantidades de energia. Qualquer um seria cpaz de

ciar muitos exemplos de enrgia e de sua utilização, mas o que realmente significa

o termo *energia?*

7-2 O que E Enegia?

O termo *energia* é tão amplo que é difícil pensar em uma deinição simples. Tecnicamente, energia é uma grandeza escalar associada ao estado de um ou mais objetos; entretanto, esta deinição é vaga demais para ser útil a quem está começando.

Uma definição menos rigorosa pode servir pelo menos de ponto de paida. Energia é um número que associamos a um sistema de um ou mais objetos. Se uma força afeta um dos objetos, fazendo-o, por exemplo, enrar em movimento, o número que

descreve a energia do sistema varia. Após um número muito grande de experimentos,

os cientistas e engenheiros conirmaram que, se o método aravés do qual atribuímos

um número à energia for definido adequadamente, esse número pode ser usado para

prever os resulados de experimentos e, mais importante, para consruir máquinas

capazes de realizar proezas fantásticas, como voar. Este sucesso se baseia em uma

propriedade fascinante do universo: a energia pode mudar de forma e ser transferida de um objeto para ouro, mas a quantidade total de energia permanece constante (a enegia é *consevaa).* Até hoje, nunca foi enconrada uma exceção desta *lei de*

conservação da energia.

Pense nas muitas formas de energia como se fossem os números que representam as quanias deposiadas em contas bancárias. Algumas regras foram estabelecidas para o significado desses números e a forma como podem ser modificados. Você pode ransferir os números que representam quanias em dinheiro de uma conta para

outra, talvez eletronicamente, sem que qualquer objeto material seja movimentado;

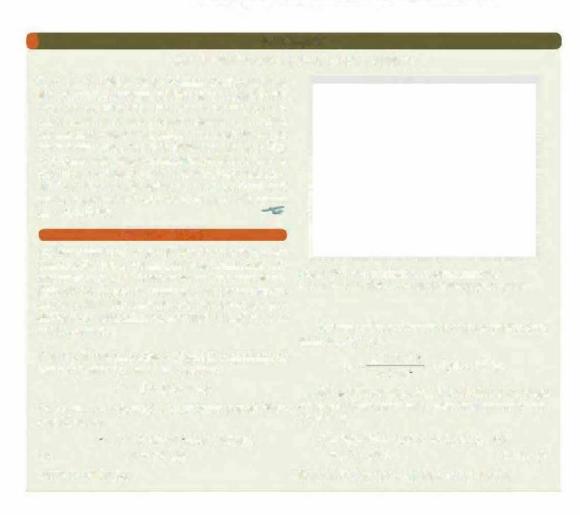
entretanto, a quantidade total de dinheiro (a soma de todos os números) permanece

constante: essa soma é conservada em todas as ransações bancárias.

Neste capítulo, concenramos a atenção em um único ipo de energia (a *energia*

***cinética)* e uma única forma de ransferência de energia (o *trabalho)*. No próximo capítulo, examinaremos algumas outras formas de energia e o modo como a lei de**

conservação da energia pode ser expressa aravés de equações.

146

CAPÍTULO 7

7-3 Enegia Cinética

A energia cinéica *K* é a energia associada ao *estado de movimento* de um objeto.

Quanto mais depressa o objeto se move, maior é a energia cinética
Quando um objeto está em repouso, a energia cinética é nula.

Para um objeto de massa *m* cuja velocidade *v* é muito menor que a velocidade

da luz,

K = lmv2

2

(energia cinética).

(7-1)

Um pato de 3,0 kg que voa a 2,0 m/s, por exemplo, tem uma energia cinética de 6,0

kg · m2/s2, ou seja, associamos esse número ao movimento do pato.

A unidade de energia cinéica (e de qualquer outra forma de energia) no SI

é o joule (J), em homenagem a James Prescott Joule, um cientista inglês do século XIX. Ela é definida a partir da Eq. 7 -1 em termos das unidades de massa e velocidade:

l joule = 1 J = 1 kg · m2/s2•

(7-2)

Assim, o pato do exemplo anterior tem uma energia cinética de 6,0 J.

Exemplo

Energia cinética em um choque de locomotivas

Em 1896, em W aco, Texas, William Crush posicionou

duas locomoivas em exremidades opostas de uma linha

férrea com 6,4 km de extensão, acendeu as caldeiras, amarrou os aceleradores para que permanecessem acionados e fez com que as locomoivas soressem uma colisão ronal,

em alta velocidade, diante de 30.000 espectadores (Fig.

7-1). Centenas de pessoas foram feridas pelos desroços; várias morreram. Supondo que cada locomoiva pesava 1,2 X

106 N e inha uma aceleração constante de 0,26 m/s2, qual

era a energia cinética das duas locomotivas imediatamente

antes da colisão?

-

I D EIAS-CHAVE

(1) Para calcular a energia cinética de cada locomotiva

usando a Eq. 7-1, precisamos conhecer a massa de cada

locomoiva e sua velocidade imediaamente antes da co Figura 7-1 O resultado de una colisão enre duas lisão. (2) Como podemos supor que cada locomoiva so lcomotivas em 1896. ***(Cortesia da Libray of Congress)*** **freu uma aceleração constante, podemos usar as equações**

da Tabela 2-1 para calcular a velocidade ***v*** **imediatamente**

antes da colisão.

Podemos calcular a massa de cada locomoiva dividindo o peso por g:

álculs **Escolhemos a Eq. 2-16 porque conhecemos os**

1 2 X 106 N

valores de todos os parâmeros, exceto v:

m **= '9,8 m/s2 = 1,22 X 105 kg.**

v2 = ***vã*** **+** ***a(x*** **- xo).**

Em seguida, usando a Eq. 7-1, calculamos a energia

Com ***v***

cinética total das duas locomotivas imediatamente antes

0 **= O** ***ex*** **-** ***x0*** **= 3,2 X 103 m (metade da distância**

inicial), temos:

da colisão:

***v2* = O + 2(0,26 u1/s2)(3.2 X 103 m),**

K = 2(iinv *2)* = (1,22 X 105 kg)(40,8 m/s)2

ou

***v* = 40,8 m/s**

= 2,0 X 108 J.

(Resposta)

(cerca de 150 km/h).

Esta colisão foi como a explosão de uma bomba

$F_x = ma_x,$

PARTE 1

ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO

147

7-4 Trabalho

Quando aumentamos a velocidade de um objeto aplicando uma força, a energia

cinéica K(= ***mv2/2)*** **do objeto aumenta. Da mesma forma, quando diminuímos a**

velocidade do objeto aplicando uma força, a energia cinética do objeto diminui. Explicamos essas variações da energia cinética dizendo que a força aplicada ransferiu energia ***para o objeto*** **ou** ***do objeto.*** **Nas ransferências de energia através de forças, dizemos que um trabaho** ***W*** **é** ***realizdo pela força sobre o objeto.*** **Mais formalmente, deinimos o trabalho da seguinte forma: Trabalho () é a energia ransferida para um objeto ou de um objeto aravés de uma**

força que age sobre o objeto. Quando a energia é transferida para o objeto, o trabalho é

positivo; quando a energia é transferida do objeto, o trabalho é negaivo.

''Trabalho", portanto, é energia ransferida; "realizar rabalho" é o ato de transferir energia. O rabalho tem a mesma unidade que a energia e é uma grandeza escalar.

O termo ***transferência*** **pode ser enganador. Não signiica que um objeto material**

entre ou saia do objeto; a ransferência não é como um fluxo de água. Ela se parece

mais com a ransferência elerônica de dinheiro enre duas contas bancárias: o valor de uma das contas aumenta, o valor da outra conta diminui, mas nenhum objeto material é ransferido de uma conta para a outra.

Note que não esamos usando a palavra "trabalho" no sentido coloquial, segundo

o qual *qualquer esforço,* físico ou mental, representa rabalho. Assim, por exemplo,

ao empurrar uma parede com força, você se cansa por causa das conrações musculares repetidas e está, no senido coloquial, realizando um rabalho. Enretanto, como este esforço não produz uma ransferência de energia para a parede ou da parede, o

trabalho realizado sobre a parede, de acordo com nossa deinição, é nulo.

7-5 Trabalho e Energia Cinética

Encontrando uma Expressão para o Trabalho

Para encontrar uma expressão para o rabalho, considere uma conta que pode deslizar ao longo de um io sem arito ao longo de um eixo *x* horizontal (Fig. 7-2). Uma força constante *F,* fazendo um ângulo p com o io, é usada para acelerar a conta.

Podemos relacionar a força à aceleração através da segunda lei de Newton, escria

para as componentes em relação ao eixo x:

(7-3)

onde *m* é a massa da esfera. Enquanto a conta sofe um deslocamento *d,* a força muda a velocidade da conta de um valor inicial v0 para um ouro

valor, *v.* Como a força

é constante, sabemos que a aceleração também é consante. Assim, podemos usar a

Eq. 2-16 para escrever, para as componentes em relação ao eixo x,

v*2 = *v5 + 2l_rd.

(7-4)

Explicitando ax, subsituindo na Eq. 7-3 e reagrupando os termos, obtemos:

'

2

'

'

P" d

2mv - 2ntvõ = *x* •

(7-5)

O primeiro termo do lado esqurdo da equação é a energia cinéica *K1* da cona no

fim do deslocamento *d;* o segundo termo é a energia cinética K; da cona no início

do deslocamento. Assim, o lado esquerdo da Eq. 7-5 nos diz que a energia cinéica

foi alterada pela força e o lado direito nos diz que esta mudança é igual a Fxd. Assim, o rabalho W realizado pela força sobre a conta (a ransferência de energia em consequência da aplicação da força) é

$$W = Fl.$$

(7-6)

Se conhecemos os valores de Fx e d, podemos usar essa equação para calcular o rabalho *W* realizado pela força sobre a cona.

Para calcular o rabalho que uma força realiza sobre um objeto quando este sofre

um deslocamento, usamos apenas a componene da força paralela ao deslocamento do

objeto. A componente da força perpendicular ao deslocamento não realiza rabalho.

Como se pode ver na Fig. 7-2, Fx = F cos >, onde F é o módulo de *F* e > é o

ângulo enre o deslocamento *d* e a força *F.* Assim,

W = Fd cos >

(trabalho executado por uma força cons1ante).

(7-7)

Como o lado direito desta equação é equivalente ao produto escalar *F. a'* também

podemos escrever

- -

***w = F-d* (trabalho execuido por uma força constante),**

-

realiza trabalho.

LF

A energia

-

é maior.

1

cinética final

F

Figua 7-2 Uma força constante F, que faz um ângulo p com

K1

o deslocamento d de uma conta em um fio, acelera a conta ao

longo do fio, fazendo sua velocidade mudar de i

[illegible]> *v*

0 para *v.* Um

''medidor de energia cinética" indica a variação resultante da

-

energia cinética da conta, do valor K; para o valor K

Deslocamento *d*

-

Atenção: **Existem duas resrições ao uso das Eqs. 7-6 a 7-8 para calcular o traba**

-

lho realizado por uma força sobre um objeto. Em primeiro lugar, a força deve ser uma

força constante, **ou seja, o módulo e a orientação da força não devem variar durante o**

F **f**

deslocamento do objeto. Mais tarde discuiremos o que fazer no caso de uma *força*

--11

variável **cujo módulo não é constante.) Em segundo lugar, o objeto deve se comportar**

como uma partícula. **Isso signiica que o objeto dve ser *rígido;* todas as suas partes devem se mover da mesma forma. Neste capítulo, consideramos apenas objetos que**

Figua 7-3 Um dos participantes

se comportam como paríiculas, como a cama e seu ocupante na Fig. 7-3.

de uma corrida de camas. Podemos

O sinal do trabalho. **O rabalho realizado por uma força sobre um objeto pode**

considerar a cama e seu ocupante como

ser positivo ou negaivo. Assim, por exemplo, se o ângulo > da Eq. 7-7 é menor que

uma partícula para calcular o trabalho

90°, cos > é positivo e o trabalho é posiivo. Se > é maior do que 90° (até 180º), cos

realizado sobre eles pela força aplicada

> é negativo e o rabalho é negativo. (Você é capaz de explicar por que o trabalho é

pelo estudante.

zero para > = 90°?) Esses resultados levam a uma regra simples: para determinar o

sinal do rabalho realizado por uma força, considere a componente da força parlela

ao deslocamento:

O rabalho zado por uma força é posiivo se a força possui uma componente

vetorial no sentido do deslocamento e negativo se a força possui uma componente

vetorial no sentido oposto. Se a força não possui uma componente vetorial na dirção

do deslocamento, o rabalho é nulo.

Uniade de trabalho. **A unidade de rabalho no SI é o joule, a mesma da energia**

cinéica. Entretanto, de acordo com as Eqs. 7-6 e 7-7, uma unidade equivalente é o

newton-mero (N · m). A unidade correspondente no sistema britânico é o pé-libra

(ft · lb). De acordo com a Eq. 7-2, temos:

1 J = 1 kg· m2/s2 = 1 N · m = 0,738 ft · lb.

(7-9)

Trabalho total realizado por várias foças. **Quando duas ou mais forças atuam**

sobre um objeto, o trabalho total realizado sobre o objeto é a soma dos trabalhos

realizados separadamente pelas forças. O rabalho total pode ser calculado de duas

formas: (1) determinando o rabalho realizado separadamente pelas forças e somando

os resultados; (2) determinando a força resultante 'e, de todas as forças e aplicando

a Eq. 7-7, com o módulo F subsituído por F,., e p subsituído pelo ângulo enre Fe,

e *d.* Também podemos usar a Eq. 7-8, substituindo *F* por *Fs.*

Teorema do Tbalho e Energia Cintica

A Eq. 7-5 relaciona a variação da energia cinética da conta (de um valor inicial

K; = *i mvl* para um valor final K *1* = } mv2) ao trabalho W (= F) realizado sobre a conta. No caso de objetos que se comportam como parículas, podemos generalizar

essa equação. Seja *ÂK* a variação da energia cinética do objeto e *W* o rabalho resultante realizado sobre o objeto. Nesse caso, podemos escrever

.K = Kr - K; = i\l,

(7-10)

que significa o seguinte:

(variação da energia) = (trabalho total executado)

cinética de uma partícula

sobre a partícula

.

Podemos também escrever

Kr = K; + W,

(7-11)

que significa o seguinte:

(energia cinética depois da

(

)

energia cinética antes \ *(* trabalho

=

)

\ execução do trabalho

\da execução do trabalho} + \executado ·

Essas relações, conhecidas tradicionalmente como torema do trabalho e energia

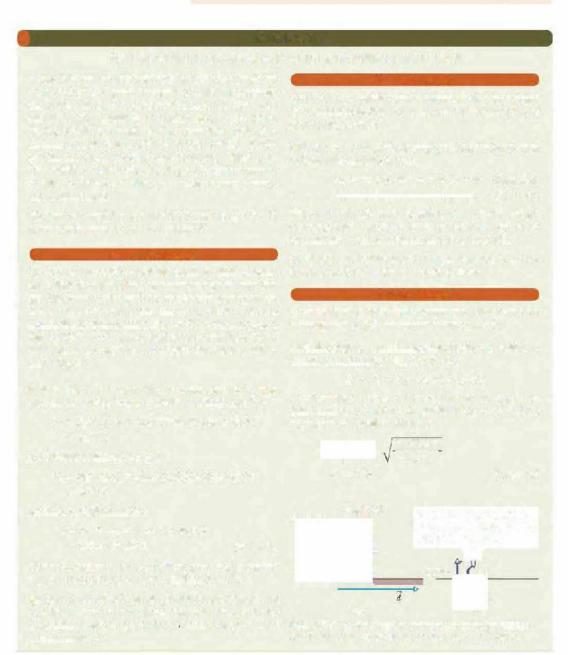
cinéica para paríículas, valem para trabalhos positivos e negativos. Se o rabalho

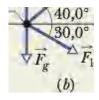
total realizado sobre uma partícula é posiivo, a energia cinéica da partícula aumenta de um valor igual ao rabalho realizado; se o rabalho

total é negaivo, a energia cinéica da parícula diminui de um valor igual ao rabalho realizado.

Por exemplo, se a enegia cinéica de uma partícula é inicialmente *5* J e a partícula recebe uma energia de 2 J (trabalho total positivo), a energia cinética final é 7 J.

Por ouro lado, se a parícula cede uma energia total de 2 J (trabalho total negaivo),

a energia cinética final é 3 J.

$$W_N = F_N d \cos 90° = F_N d(0) = 0.$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2W}{m}} =$$

150

CAPÍTULO 7

-TESTE 1

Uma partícula está se movendo ao longo do eixo *x*. A energia cinética aumena, diminui ou permanece a mesma se a velocidade da partícula varia (a) de -3 m/s para -2 m/s

e (b) de -2 m/s para 2 m/s? (c) Nas situações dos itens (a) e (b) o trabho realizado

sobre a partícula é positivo, negativo ou nulo?

Exemplo

Trabalho realizado por duas forças constantes: espionagem industrial

A Fig. 7-4a mosra dois espiões indusriais arrastando um

IDEIA-CHAVE

core de 225 kg a partir do repouso e assim produzindo

um deslocamento *d* de módulo 8,50 m, em direção a um

-

Como tanto o módulo como a orientação das duas forças

caminhão. O empurrão . do espião 001 tem um módulo são consantes, podemos calcular o rabalho realizado por de 12,0 N e faz um ângulo de 30,0° para baixo com a ho elas usando a Eq. 7-7.

rizonal; o puxão ' 2 do espião 002 tem um módulo de 10,0 *álculos* Como o módulo da força ravitacional é *mg*, onde N e faz um ângulo de 40,0° para cima com a horizonal. *m* é a massa do cofre, temos:

Os módulos e orientações das forças não variam quando

o cofre se desloca e o atrito enre o core e o arito com o

***W* 1 = *mgd* cos 90º = *rngd(O)* = O (Resposta)**

piso é desprezível.

e

(Resposta)

(a) Qual é o rabalho total realizado pelas forças *i* e *i* Estes resulados já eram esperados. Como as duas forças sobre o cofre durante o deslocamento *d?*

são perpendiculares ao deslocamento do core, não realizam trabalho e não ransferem energia para o core.

I D EIAS-CHAVE

(c) O core está inicialmente em repouso. Qual é sua ve

(1) O rabalho total *W* realizado sobre o core é a soma locidade v

dos rabalhos realizados separadamente pelas duas for1 após o deslocamento de 8,50 m?

ças. (2) Como o core pode ser ratado como uma partícu

IDEIA-CHAVE

la e as forças são constantes, tanto em módulo como em A velocidade do core varia porque sua energia cinética

- -

orienação, podemos usar a Eq. 7-7 (W = *Fd* cos >) ou a muda quando . e F; transferem energia para ele.

Eq. 7-8 (W = *F · d)* para calcular esses rabalhos. Como

conhecemos o módulo e a orientação das forças, escolhe *Cculos* Podemos relacionar a velocidade ao rabalho remos a Eq. 7-7.

alizado combinando as Eqs. 7-1 O e 7 -1:

W = K

***álculos* De acordo com a Eq. 7-7 e o diagrama de corpo**

1 - K; = !niv} - !mvf.

livre do core (Fig. 7-4b), o rabalho realizado por *i* é

A velocidade inicial *vi* é zero e agora sabemos que o rabalho realizado é 153,4 J. Explicitando *v* W

***1* e subsituindo**

1 = F1 l cos /> 1 = (12,0 N)(8,50 11)(cos 30,0º)

os valores conhecidos, obtemos:

= 88,33 J,

2(153,4 1)

e o rabalho realizado por *i* é

225 kg

W

= 1 ,17 111/s.

(Resposta)

***2* = *F2d* cos i = (10,0 N)(8,50 n1)(cos 40,0º)**

= 65,11 J.

Assim, o rabalho total W é

Espião 002

Apenas as componentes

***W* = *w*,**

paralelas ao deslocamento

T W2 = 88,33 J + 65,11 J

realizam trabalho.

= 153,4 J = 153 J.

(Resposta)

Durante o deslocamento de 8,50 m, portanto, os espiões

ransferem 153 J para a eneria cinética do cofre.

Core

(b) Qual é o rabalho *W* realizado pela força gravitacional

8

[illegible] sobre o cofre durante o deslocamento e qual é o rabalho**

(a)

WN realizado pela força normal FN sobre o core durante Figura 7-4 (a) Dois espiões arrastam um cofre, produzindo o deslocamento?

um deslocamento *d.* (b) Diagrama de corpo livre do core.

PARTE 1

ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO

151

Exemplo

Trabalho realizado por uma força constante expressa em termos dos vetores unitários

Durante uma tempestade, um caixote desliza pelo piso

escorregadio de um estacionamento, sorendo um desloA componente da força paralela ao deslocamento

-

A

realiza um trabalho *negativo*, reduzindo a

camento *d* = (-3,0 m)i enquanto é empurrado pelo ven—

velocidade do caixote.

-

A

A

to com uma forçaF = (2,0 N)i + (-6,0 N)j. A situação e

y

os eixos do sistema de coordenadas esão representados

na Fig. 7-5.

(a) Qual é o trabalho realizado pelo vento sobre o caixo

- *d*

te?

Figura 7-5 Uma força *F* desacelera um caixote durante um

deslocamento *a.*

IDEIA-CHAVE

Como podemos tratar o caixote como uma parícula e como sobre o caixote, reirando 6,0 J da energia cinéica do caia força do vento é consante, podemos usar a Eq. 7-7 (W = xote.

***F d* cos p) ou a Eq. 7-8 *(W = F* · d) para calcular o trabalho. (b) Se o caixote tem uma energia cinéica de 10 J no iní**

Como conhecemos *F* e a em termos dos vetores unitários, cio do deslocamento *a.* qual é a energia ao final do desescolhemos a Eq. 7-8.

locamento?

***álculs* Temos:**

IDEIA-CHAVE

(Resposta) A redução da energia elérica indica que o caixote foi

A força realiza, portanto, um rabalho negaivo de 6,0 J reado.

7-6 Trabalho Realizado pela Força Gravitacional

Vamos examinar agora o trabalho realizado sobre um objeto pela força gravitacional. A Fig. 7-6 mostra um tomate de massa *m* que se comporta como partícula, arre

-

messado para cima com velocidade inicial v

A força executa um

***0* e, portanto, com uma energia cinética**

F

inicial *K;*

f

= i *mv5.* Na subida, o tomate é desacelerado por uma força gravitacional

trabalho *negativo,*

***g,* ou seja, a energia cinéica do tomate diminui porque *g* realiza trabalho sobre o -**

reduzindo a velocidade

tomate durante a subida. Uma vez que o tomate pode ser ratado como uma partícula, *d*

e a energia

podemos usar a Eq. 7-7

cinética.

***(W = F d* cos p) para expressar o rabalho realizado durante**

-

-

um deslocamento *d.* No lugar de *F,* usamos *mg,* o módulo de [illegible] Assim, o rablho *W8* realizado pela força gravitacional [illegible] é

***iV8 = mgd* cus > (trabalho executado por uma força ravitacional}. (7-12) Durante a subida, a força g tem o sentido contrário ao do deslocamento *d,* como Figura 7-6 Por causa da força mosra a Fig. 7-6. Assim, p**

ravitacional [illegible] a velocidade de um

= 180º e

tomate de massa *m* arremessado para

W: = mgd* cos 180º = *,ngd(-* l) = *-rngd.

(7-13) cima diminui [illegible] *v0* para *v* durante um

deslocamento *d.* Um medidor de

O sinal negativo indica que, durante a subida, a força gravitacional remove uma energia cinética indica a variação energia *mgd* da energia cinéica do objeto. Isto está de acordo com o fato de que o resultante da energia cinética do tomae, objeto perde velocidade na subida.

de K; (= *imvõ)* para K *1(= }.mv').*

$W_a = -W_g.$

Depois que o objeto atinge a altura máxima e começa a descer, o ângulo *p* enre

a força *Fg* e o deslocamento a é zero. Assim,

W =

:

mgdcos O[a] = nigd(+ l) = +*mgd.*

(7-14)

O sinal positivo significa que agora a força gravitacional transfere uma energia *mgd*

para a energia cinéica do objeto. Isto está de acordo com o fato de que o objeto ganha velocidade na descida. (Na realidade, como vamos ver no Capítulo 8, ransferências de enrgia associadas à subida e descida de um objeto envolvem o sistema completo objeto-Terra.)

Trabalho Realizado para Levantar e Baixar um Objeto

Suponha agora que levantamos um objeto que se comporta como uma partícula aplicando ao objeto uma força vertical *F.* Durante o deslocamento para cima, a força aplicada realiza um trabalho positivo *w.* sobre o objeto, enquanto a força gravitacional realiza um rabalho negaivo *W8*• A força aplicada tende a ransferir energia para o objeto, enquanto a força gravitacional tende a remover energia do objeto. De

acordo com a Eq. 7-10, a variação lK da energia cinética do objeto devido a essas

duas ransferências de energia é

AK = Kr-Ki = *wJ* + Wg,

(7-15)

onde K *1*é a energia cinética no fim do deslocamento e K; é a energia cinética no início do deslocamento. A Eq. 7-15 também é válida para a descida do objeto, mas, nesse

caso, a força gravitacional tende a transferir energia *para* o objeto, enquanto a força aplicada tende a remover energia *do* objeto.

Em muitos casos, o objeto está em repouso antes e depois do levantamento. Isso

acontece, por exemplo, quando levantamos um livro do chão e o colocamos em uma

estante. Nesse caso, K *1* e K; são nulas e a Eq. 7-15 se reduz a

***wa* + w(= o**

ou

(7-16)

Note que obtemos o mesmo resultado se K *1* e K; forem iguais, mesmo que não sejam nulas. De qualquer forma, o resultado signiica que o trabalho realizado pela força aplicada é o negativo do rabalho realizado pela força graviacional, ou seja,

que a força aplicada ransfere para o objeto a mesma quanidade de energia que a

força gravitacional remove do objeto. Usando a Eq. 7-12, podemos escrever a Eq.

7-16 na forma

W_0 = -*rngd cos* > (trabalho para levantar e baixar; *K* -

'

K1),

(7-17)

onde *p* é o ângulo entre _ e *d.* Se o deslocamento é verticalmente para cima Fig.

7-7a), *p* = 180° e o trabalho realizado pela força aplicada é igual a *mgd.* Se o deslocamento é verticalmente para baixo Fig. 7-7 *b*), *p* = Oº e o trabalho realizado pela força aplicada é igual a - *mgd.*

Executa um

-

Figua 7-7 (a) Uma força *F* faz um

-

Deslocamento

- trabalho

objeto subir. O deslocamento *d* do

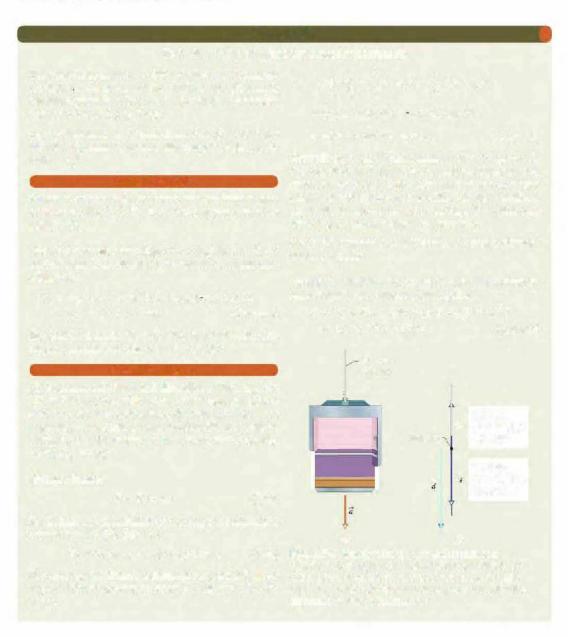
d

F

para cima

negativo

[illegible]

objeto faz um ângulo *p* = 180º com a

As Eqs. 7-16 e 7-17 se aplicam a qualquer situação em que um objeto é levantado ou baixado, com o objeto em repouso antes e depois do deslocamento. Elas são independentes do módulo da força usada. Assim, por exemplo, se você levanta acima

da cabeça uma caneca que estava no chão, a força que você exerce sobre a caneca

varia consideravelmente durante o levantamento. Mesmo assim, como a caneca está

em repouso antes e depois do levantamento, o rabalho que a sua força realiza sobre

a caneca é dado pelas Eqs. 7-16 e 7-17, onde, na Eq. 7-17, *mg* é o peso da caneca e

***d* é a diferença enre a altura inicial e a altura inal.**

Exemplo

Trabalho realizado sobre um elevador acelerado

Um elevador de massa m = 500 kg está descendo com velocidade *V;* = 4,0 m/s quando o cabo de sustenação começa Wr = m(- [illegible] + *s)* d cos > = ._ ,ngd cos > 5

5

a deslizar, permitindo que o elevador caia com aceleração

4

constante ã = g *15* (Fig. 7-8a).

= 5 (500 kg)(9.8 n1fs2)(12 m) cos 180º

(a) Se o elevador cai de uma altura *d* = 12 m, qual é o

= -4,70 X 104 J = -47 k.J.

(Resposta)

**trabalho W *8* realizado sobre o elevador pela força ravitacional [illegible]

Atenão **Note que Wr não é simplesmente o negaivo de**

***W8*• A razão disso é que, como o elevador acelera durante a**

IDEIA-CHAVE

queda, sua velocidade vaia e, consequentemente, a enegia

Podemos tratar o elevador como uma parícula e, por cinética também varia. Assim, a Eq. 7-16 (que envolve a tanto, usar a Eq. 7-12 *(W*

suposição de que a energia cinética é igual no início e no

***8 = mgd* cos >) para calcular o**

trabalho *W*

inal do processo) *não se aplica* neste caso.

8•

(c) Qual é o rabalho total *W* realizado sobre o elevador

***álculo* De acordo com a Fig. 7-8b, o ângulo entre [illegible] e o durante a queda?**

deslocamento *d* do elvador é 0°. Assim, de acordo com

a Eq. 7-12,

***Cálcuo* O rabalho total é a soma dos trabalhos realizados**

***Wx* = *n1gd* cos Oº = (500 kg)(9,8 n1/s2)(12 m)(L)**

pelas forças a que o elevador está sujeito:

= 5,88 x 104 J = 59 kJ.

(Resposta)

W = W +

1

Wr = 5,88 X 104 J - 4,70 X 104 J

(b) Qual é o rabalho W

= 1,18 X 104 J = 12 kJ.

(Resposta)

r realizado sobre o elevador pela

força f exercida pelo cabo durante a queda?

Cabo do

I D EIAS-CHAVE

F 1 = ma.

(7-18)

Explicitando *T,* substituindo *F8* por *mg* e subsituindo o

resultado na Eq. 7-7, obtemos

(a)

(b)

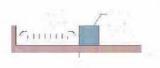
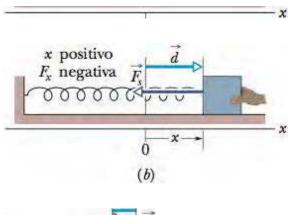
W1 = *Td* cos > = *1n(a* + *g)d* cos /J.

(7-19) Figua 7-8 Um elevador, que esava descendo com

velocidade *V;*, de repente começa a acelerar para baixo. (a)

Em seguida, subsituindo a aceleração *a* (para baixo) por O elevador sore um deslocamento d com uma aceleração

- *g/5* e o ângulo > enre as forças f e *mg* por 180°, ob constante *a*= *g/5.* (b) Diagrama de corpo livre do elevador, temos

mosrando também o deslocamento.

(d) Qual é a energia cinética do elevador no inal da que *álculo* De acordo com a Eq. 7-1, podemos escrever a da de 12 m?

eneria cinética no início da queda como *K;* = { *mv1* .

Nesse caso, a Eq. 7-11 pode ser escrita na forma

IDEIA-CHAVE

K1* = <*1* + *W* = *!1nv7* + *W

De acordo com a Eq. 7-11 *(K1* = *K;* + W), a variação da

=

eneria cinética é igual ao trabalho total realizado sobre

[illegible] kg)(4,0 m/s)2 + 1.1 8 X 10* J**

o elevador.

= 1,58 X 104 J = 16 k.T.

(Resposta)

7-7 Trabalho Realizado por uma Força Elástica

x=O

Bloco

Vamos agora discuir o rabalho realizado sobre ua parícula por um ipo paricular

. =

• o

preso

de *força variável:* a fora elástica exercida por uma mola. Muitas forças na natureza à mola

têm a mesma forma matemáica que a força de uma mola. Assim, examinando esta

o

força em paricular, podemos compreender muitas ouras.

(a)

A Força lástica

A Fig. 7-9a mosra uma mola no stado relaxado, ou seja, nem comprimida nem

alongada. Uma das exremidades está ixa, e um objeto que se comporta como uma

parícula, um bloco, por exemplo, está preso na oura exremidade. Se alongamos a

mola puxando o bloco para a direita, como na Fig. 7-9b, a mola puxa o bloco para a

-

esquerda. (Como a força elásica tende a restaurar o estado relaxado, ela também é

chamada de *força restauradora.)* Se comprimimos a mola empurando o bloco para

d

x negativo

a esquerda, como na Fig. 7-9c, a mola empurra o bloco para a direita.

, positiva

Como uma boa aproximação para muitas molas, a força , é proporcional ao

deslocamento *d* da extremidade livre a partir da posição que ocupa quando a mola

-xi

***x* está no estado relaxado. A *força elástica* é dada por**

- -

(e)

F < = *-kd* (lei de Hooke).

(7-20)

Figua 7-9 *(a)* Uma mola no estado

A Eq. 7-20 é conhecida como lei de Hooke em homenagem a Robert Hooke,

relaxado. A origem do eixo *x* foi

cienista inglês do inal do século XVII. O sinal negativo da Eq. 7-20 indica que o

colocada na exremidade da mola que

senido da força elástica é sempre oposto ao senido do deslocamento da exremida

está presa ao bloco. *(b)* O bloco sofre

de livre da mola. A constante *k* é chamada de constante elástia (ou constante de um deslocamento d e a mola sore uma

força) e é uma medida da rigidez da mola. Quanto maior o valor de *k,* mais rígida é distensão (variação positiva de *x).*

a mola, ou seja, maior é a foça exercida pela mola para um dado deslocamento. A

Observe a força restauradora ,

exercida pela mola. (e) A mola sofre

unidade de *k* no SI é o newton por mero.

uma compressão (variação negativa

Na Fig. 7-9 foi raçado um eixo *x* paralelo à maior dimensão da mola, com a

de x). Observe novamente a força

origem *(x* = 0) na posição da exremidade livre quando a mola está no estado re

restauradora.

laxado. Para esta configuração, que é a mais comum, podemos escrever a Eq. 7-20

na forma

F* = *-x

X

(lei de Hookc),

(7-21)

onde mudamos o índice. Se *x* é posiivo (ou seja, se a mola está alongada para a

direita), *Fx* é negativa (é um puxão para a esquerda). Se *x* é negativo (ou seja, se a mola está comprimida para a esquerda), *Fx* é positiva (é um empurão para a direita).

Note que a força elástica é uma *força variável,* uma vez que depende de *x*, a posição da exremidade livre. Assim, *Fx* pode ser representada na forma *F(x)*. Note também que a lei de Hooke é uma relação *linear* entre *Fx* e *x*.

Trabalho Realizado por uma Força Elástica

Para determinar o trabalho realizado pela mola quando o bloco da Fig. 7-9a se

move, vamos fazer duas hipóteses simplificadoras a respeito da mola. (1) Vamos

supor que se rata de uma mola *sem massa,* ou seja, de uma mola cuja massa é

$W_s = \sum -F_{xj}\,\Delta x.$

$W_s = \frac{1}{2}kx_i^2 - \frac{1}{2}kx_f^2$

desprezível em relação à massa do bloco. (2) Vamos supor que se trata de uma

mola ideal**, ou seja, de uma mola que obedece exatamente à lei de Hooke. Vamos**

supor também que não existe atrito entre o bloco e o piso e que o bloco se comporta como uma partícula.

Vamos dar ao bloco um impulso para a direita, apenas para colocá-lo em movimento. Quando o bloco se move para a direita, a força elásica Fx realiza rablho sobre ele, diminuindo a energia cinética e desacelerando o bloco. Entretanto, não

***podemos* calcular o rabalho usando a Eq. 7-7 (W = *Fd* cos J) porque essa equação só é válida se a força é constante. A força elástica é uma força variável.**

Para determinar o trabalho realizado pela mola, podemos usar os métodos do

cálculo. Seja *X;* a posição inicial do bloco e x *1* a posição do bloco em um instante posterior. Vamos dividir a distância entre essas duas posições em muitos segmentos, cada um com um pequeno comprimento :. Rotulamos esses segmentos, a partir de *X;*, como segmentos 1, 2 e assim

por diante. Quando o bloco se move no interior de um dos segmentos, a força elásica praticamente não varia, já que o

segmento é tão curto que x é praicamente constante. Assim, podemos supor que

o módulo da força é aproximadamente constante denro de cada segmento. Vamos rotular esses módulos como Fx *1* no segmento 1, F2 no segmento 2 e assim por diante.

Com uma força constante em cada segmento, *podemos* calcular o trabalho realizado dentro de cada segmento usando a Eq. 7-7. Nesse caso, J = 180°, de modo que cos J = -1. Assim, o trabalho realizado é -Fx *1* u no segmento 1, -F 2lx no

segmento 2 e assim por diante. O trabalho total Ws realizado pela mola de *X;* a x *1* é a soma de todos esses rabalhos:

(7-22)

ondej = 1, 2 ... é o número de ordem de cada segmento. No limite em que lx tende

a zero, a Eq. 7-22 se toma

o bloco quando este se move de *X;* para *x1• Atenção:* a posição final *x1* aparece no *segundo* termo do lado direito da Eq. 7-25. Assim, de acordo com a Eq. 7-25,

O rabalho *W,* é positivo se a posição nal do bloco esá mais próxima da posição no estado relaxado (x = O) que a posição inicial, e negativo se a posição inal está mais

afasada de *x* = O que a posição inicial. O rabalho é zero se a posição nal do bloco está à mesma distância de *x* = O que a posição inicial.

Supondo que *X;* = O e chamando a posição inal de *x,* a Eq. 7-25 se toma

W, = -tkx2

(trabalho de 11 11a foça elís1ico).

(7-26)

$$\Delta K = K_f - K_i = W_a + W_s,$$

O Tabalho Realizado por uma Força Aplicada

Suponha agora que deslocamos o bloco ao longo do eixo *x* mantendo uma força *F.*

aplicada ao bloco. Durante o deslocamento, a força aplicada realiza sobre o bloco

um rabalho *w* •. enquanto a força elástica realiza um rabalho *W,*. De acordo com a Eq. 7-10, a variação *K* da energia cinética do bloco devido a essas duas ransferências de energia é (7-27)

onde K *1* é a energia cinéica no inal do deslocamento e K; é a energia cinéica no início do deslocamento. Se o bloco está em repouso no início e no im do deslocamento, K; e K *1* são iguais a zero e a Eq. 7-27 se reduz a *w, = -w.,.*

(7-28)

Se um bloco que está preso a uma mola se enconra em repouso antes e depois de

um deslocamento, o rabalho realizado sobre o bloco pela força responsável pelo

deslocamento é o negativo do trabalho realizado sobre o bloco pela força elásica.

***Atenção:* se o bloco não estiver em repouso antes e depois do deslocamento, esta**

afrrmação *não* é verdadeira.

"TESTE 2

Em rês situações, as posições inicial e inal, respectivamene, ao longo do eixo *x* da Fig.

7-9 são: (a) -3 cm, 2 cm; b) 2 cm, 3 cm; (c) -2 cm, 2 cm. Em cada situação, o rabalho realizado sobre o bloco pela força elástica é posiivo, negativo ou nulo?

Exemplo

Trabalho realizado por uma mola para mudar a energia cinética

Na Fig. 7-10, depois de deslizar sobre uma superície ho

A força da mola executa um trabalho *negaio,*

rizontal sem atrito com velocidade *v* = 0,50 m/s, um pote

reduzindo a velocidade e a energia cinética.

de cominho de massa *m* = 0,40 kg colide com uma mola

de constante elástica *k* = 750 N/m e começa a comprimila. No instante em que o pote para momentaneamente por causa da força exercida pela mola, de que distância *d* a

Se1n atrito

m

mola foi comprimida?

1 • d i

I D EIAS-CHAVE

Parada

Pri1neiro contato

1. O rabalho Ws realizado sobre o pote pela força elási Figura 7-10 Um pote de massa *m* se move com velocidade v ca esá relacionado à distância *d* pedida aravés da Eq. em direção a uma mola de constante *k*.

7-26 (W, = -1 x2) com *d* substituindo *x*.

2. O rabalho W, também está relacionado à energia ciné Substituindo a energia cinética inicial e final pelos seus ica do pote através da Eq. 7-10 (K *1*-K; = *)*.

valores (terceira ideia-chave), temos:

3. A energia cinética do pote tem um valor inicial K = *i mv2*

O - *!mv* 2 = *-!kd* 2.

e é nula quando o pote está momentaneamente em repouso.

Simplificando, explicitando *d* e subsituindo os valores

conhecidos, obtemos:

***álculs* Combinando as duas primeiras ideias-chave, escrevemos o teorema do rabalho e energia cinética para o**

***d* = *V {_* = (O 50 /·) I 0,40 kg**

***j* "**

pote na seguinte forma:

k

·· m s \/ 750 N/m

K -

= 1,2 X 10-2 m = l,2 c111.

(Resposta)

1

K *1* = -!kd *2*•

$$\Delta W_j = F_{j,\text{méd}}\,\Delta x.$$

7-8 Trabalho Realizado por uma Força

Variável Genérica

Análise Unidimensional

V amos voltar à situação da Fig. 7-2, mas agora suponha que a força aponta no sentido

posiivo do eixo *x* e que o módulo da força varia com a posição *x.* Assim, quando a conta (partícula) se move, o módulo *F(x)* da força que realiza trabalho sobre ela varia. Apenas o módulo da força varia; a orienação permanece a mesma. Além disso, o módulo da força em qualquer posição não varia com o tempo.

A Fig. 7-lla mostra o gráico de *uma força variável unidimensional* como a que

acabamos de descrever. Queremos obter uma expressão para o rabalho realizado por

esta força sobre a partícula quando ela se desloca de uma posição inicial *X;* para uma posição final *xt* Entretanto, *não podemos* usar a Eq. 7-7 *(W* = *F d* cos >) porque ela só é válida no caso de uma força consante *F.* Assim, usaremos novamente os métodos do cálculo. Dividimos a área sob a curva da Fig. 7-1 la em um grande número de faixas esreitas de largura *x* (Fig. 7-1 *lb*). Escolhemos *x* suicientemente pequeno para que possamos considerar a força *F(x)* aproximadamente constante nesse intervalo. Vamos chamar de Fj,td o valor médio de F(x) no intervalo de ordemj. Nesse caso, j,méd na Fig. 7-llb é a altura da faixa de ordemj.

Com Fj,méd constante, o incremento (pequena quanidade) de rabalho . *;* realizado pela força no intervalo de ordem *j* pode ser calculado usando a Eq. 7 -7: (7-29)

Na Fig. 7-1 *lb*, . *;* é, portanto, igual à área sob a faixa retangular sombreada de ordemj.

Para determinar o rabalho total *W* realizado pela força quando a parícula se desloca de *X;* para *xl* somamos as áreas de todas as faixas entre *X;* e *x1* da Fig. 7-1 lb: *W* = I [illegible] *í*= *L* 0.mo..Y.

(7-30)

A área sob a curva pode

O trabalho é igual à

o *X;*

pela Eq. 7-32 e é represenado pela área

XI

Ü X;

ÓX

sombreada enre a curva e o eixo *x* e

***(* e)**

***(* d)**

entre *X;* e *x1*.

$$\vec{F} = F_x\hat{\mathrm{i}} + F_y\hat{\mathrm{j}} + F_z\hat{\mathrm{k}},$$

$$W = \int_{r_i}^{r_f} dW = \int_{x_i}^{x_f} F_x\,dx + \int_{y_i}^{y_f} F_y\,dy + \int_{z_i}^{z_f} F_z\,dz.$$

A Eq. 7-30 é uma aproximação porque a "escada" formada pelos lados superiores

dos retângulos da Fig. 7-1 lb é apenas uma aproximação da curva real de *F(x)*.

Podemos melhorar a aproximação reduzindo a largura *x* dos retângulos e usando mais retângulos, como na Fig. 7-1 *lc.* No limite, fazemos a largura dos retângulos tender a zero; nesse caso, o número de retângulos se tona ininitamente grande e

temos, como resultado exato,

***W* = lim *L*),111,!tt [illegible]

(7-31)

[illegible]

Este limite corresponde à definição da integral da função *F(x)* entre os limites *X;* e xt Assim, a Eq. 7-31 se tona

Lrr

W = J'(x) dx (trabalho de uma força vaiável).

(7-32)

***x* ,**

Se conhecemos a função *F(x)*, podemos substituí-la na Eq. 7-32, introduzir os

limites de integração apropriados, efetuar a integração e assim calcular o rabalho.

(O Apêndice E contém uma lista das integrais mais usadas.) Geomericamente, o

rabalho é igual à área enre a curva de *F(x)* e o eixo *x* e enre os limites *X;* e *x1* (área sombreada na Fig. 7-l l).

Análise Tridimensional

Considere uma parícula sob a ação de uma força tridimensional

(7-33)

cujas componentes Fx, Fy e Ft podem depender da posição da partícula, ou seja, podem ser funções da posição. Vamos, porém, fazer rês simplificações: Fx pode depender de *x,* mas não de y ou *z,* F>, pode depender de y, mas não de *x* ou *z;* Fz pode depender *de z,* mas não de *x* ou *y.* Suponha que a partícula sora um deslocamento incremental

dr = dxi + dyj + dz:.

(7-34)

De acordo com a Eq. 7-8, o incremento *dW* do trabalho realizado sobre a partícula pela força *F* durante o deslocamento *dr* é

_ ,

d\Y = F·dr*= Fx.t + ,. *dy* + Fi *dz.

(7-35)

O rabalho *W* realizado por *F* enquanto a partícula se move de uma posição inicial r; de coordenadas (x;, Y;, z;) para uma posição inal r *1* de

coordenadas (xt) z *1)* é, portanto,

(7-36)

Se *F* possui apenas a componente *x*, os termos da Eq. 7-36 que envolvem *y* e *z* são nulos e a equação se reduz à Eq. 7-32.

Teorema do Trabalho e Energia Cinética com uma

Força Variável

A Eq. 7-32 permite calcular o trabalho realizado por uma força variável sobre uma

parícula em uma situação unidimensional. V amos agora verificar se o trabalho calculado é realmente igual à variação da energia cinética da partícula, como airma o teorema do rabalho e energia cinética.

Considere uma parícula de massa *m* que se move ao longo de um eixo *x* e está

sujeita a uma força *F(x)* paralela ao eixo *x*. De acordo com a Eq. 7-32, o rabalho re-

$$= \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2.$$

alizado pela força sobre a partícula quando a partícula se desloca da posição *X;* para a posição *x1* é dado por

W = lxr F(x) dx = fxr ,na dx,

(7-37)

x,

,,

onde usamos a segunda lei de Newton para subsituir *F(x)* por *ma.* Podemos escrever o integrando *ma x* da Eq. 7-37 como

dv

'ta dx = 111 dt dx.

(7-38)

Usando a rera da cadeia para derivadas, temos:

dv

dv dx

dv

dt

dx dt

Observe que quando mudamos a variável de integração de *x* para *v*, ivemos que expressar os limites da interal em termos da nova variável. Observe também que,

como a massa *m* é constante, pudemos colocá-la do lado de fora da integral.

Reconhecendo os termos do lado direito da Eq. 7-41 como energias cinéicas,

podemos escrver esta equação na forma

***W* = *K1* - *K*- 1 = *lK* '**

que é o teorema do rabalho e energia cinéica.

Exemplo

Cálculo do trabalho por integração gráfica

Na anestesia epidural, como a usada nos partos, o médico a pele é perfurada e a força necessária diminui. Da mesma ou anestesista precisa introduzir uma agulha nas cosas do forma, a agulha perfura o ligamento interespinhoso em *x* =

paciente e atravessar várias camadas de tecido até chegar 18 mm e o ligamento amarelo, relaivamente duro, em *x* =

numa região esreita, chamada de espaço epidural, que 30 mm. A agulha enra, enão, no espaço epidural (onde deve envolve a medula espinhal. A agulha é usada para injetar ser injetado o líquido anestésico) e a força diminui bruscao líquido anestésico. Este delicado procedimento requer mente. Um médico recém-formado precisa se familiarizar muita prática, pois o médico precisa saber quando chegou com este comporamento da força com o deslocamento para ao espaço epidural e não pode ulrapassar a região, um erro saber quando deve parar de empurrar a agulha. (Este é o paque poderia resultar em sérias complicações.

drão que é proramado nas simulações em realidade virtual

A sensibilidade de um médico em relação à peneração de uma anestesia epidural.) Qual é o trabalho *W* realizado da agulha se baseia no fato de que a força que deve ser apli pela força exercida sobre a agulha para levá-la até o espaço cada à agulha para fazê-la aravessar os tecidos é vaiável. A epidural emx = 30 mm?

Fig. 7-12a é um ráfico do módulo *F* da força em função do

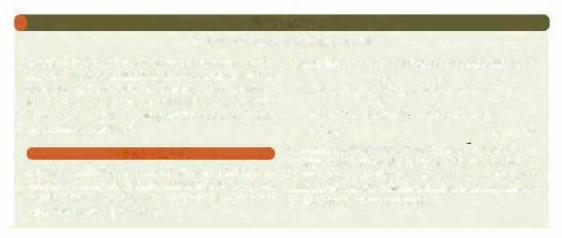
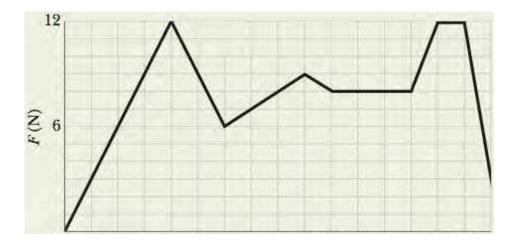
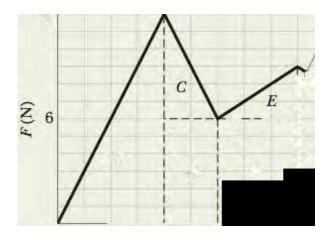
deslocamento *x* da ponta da agulha durante uma anestesia

IDEIAS-CHAVE

epidural típica. (Os dados oriinais foram retiicados para (1) Podemos calcular o trabalho *W* realizado pela força produzir os segmentos de rea.) Quando *x* cresce a parir de variável *F(x)* interando a força para todas as posições *x* O, a ele oferece resistência à agulha, mas em *x* = 8,0 mm consideradas. De acordo com a Eq. 7-32,

160

CAPÍTULO 7

[illegible]

a curva em regiões retangulares e riangulares, como na

***W* =**

FC:r) *dx.*

Fig. 7-12b. A área da região riangular *A*, por exemplo, é

dada por

Queremos calcular o trabalho realizado pela força durante o deslocamento de *X;* = O até *x* área

***1* = 0,030 m. (2) Pode**

A = í(0,0080 m)(l2 N) = 0,048 N·m = 0,048 J.

mos calcular a integral determinando a área sob a curva Depois de calcular as áreas de todas as regiões da Fig.

da Fig. 7-12a:

7-12b, descobrimos que o rabalho total é

W* = (son1a das áreas d1S regiões *deA* a *K)

***W* = (área entre a curva da força).**

e o e1xox. dex; ax *1*

= 0,048 + 0,024 + 0,012 + 0,036 + 0,009 + 0,001

***álculos* Como nosso gráfico é formado por segmentos**

+ 0,016 + 0,048 + 0,016 + 0,004 + 0,024

de reta, podemos calcular a área separando a região sob

= 0,238 .

(Resposca)

12

1 1

F

J

1

1

1

1

1

1

1

1

-_

__ (_- '1

1

1

1

1

1 1

1

'

t

1

- - ---1 1

I K I

A

1

1

1

1

1

I G I

H

I l i 1

B

D

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

t

1

1

1

1

1

1

o

1

1

1 1 '

10

partícula. Qual é o rabalho realizado sobre a partícula

W = { 3x2 dx **+ f º 4 *dy* = 3 *{'x2 dx* + 4 f º *dy* quando ela se desloca das coordenadas (2 m, 3 m) para**

J2

J3

J2

J3

(3 m, O m)? A velocidade da partícula aumenta, diminui

= [illegible] + 4(yJg = [33 - 23] + 4[0 - 3]

ou permanece a mesma?

= 7,0 J.

(Resposta}

IDEIA-CHAVE

O resultado positivo signiica que a força *F* ransfere energia para a partícula. Assim, a energia cinética da partícula

A força é variável porque sua componente *x* depende do aumenta e, como *K* = i *mv2*, a velocidade escalar também valor de *x*. Assim, não podemos usar as Eqs. 7-7 e 7 -8 para aumenta. No caso de trabalho negativo, a energia cinéica calcular o rabalho realizado. Em vez disso, devemos usar e a velocidade teriam diminuído.

a Eq. 7-36 para integrar a força.

7-9 Potência

A axa de variação com o tempo do trabalho realizado por uma força recebe o nome

de potência. Se uma força realiza um rabalho *W* em um intervalo de tempo .*t,* a potência mdia desenvolvida durante esse intervalo de tempo é

(otência média).

(7-42)

A potência instantânea P é a taxa de variação instantânea com a qual o rabalho é realizado, que pode ser escrita como

P dW

= dt

(otência ins1antâna}.

(7-43)

Suponha que conhecemos o trabalho $W(t)$ realizado por uma força em função do

tempo. Nesse caso, para determinar a potência instantânea P, digamos, no instante

t = 3,0 s da relização do rabalho, basta derivar W(t) em relação ao tempo e calcular

o valor da derivada para *t* = 3,0 s.

A unidade de potência no SI é o joule por segundo. Essa unidade é usada com

tanta frequência que recebeu um nome especial, o watt *)*, em homenagem a James

Watt, cuja contribuição foi fundamental para o aumento da potência das máquinas a

vapor. No sistema britânico, a unidade de potência é o pé-libra por segundo (ft · lb/s).

O horsepower (hp) também é muito usado. Seguem as relações enre essas unidades

e a unidade de potência no SI.

l watl = 1 W = 1 J/s = 0,738 (t · lb/s

(7-44)

e

1 horsepower = 1 bp = 550 ft · lb/s = 746 W.

(7-45)

Exainando a Eq. 7-42, vemos que o trabalho pode ser expresso como potência

multiplicada por tempo, como na unidade quilowatt-hora, muito usada na prática. A

relação enre o quilowatt-hora e o joule é a seguinte:

l quilo\vatt-hora = l kW · h = (103 W)(3600 s)

= 3.60 X 106 J = 3.60 MJ.

(7-46)

Talvez por aparecer nas contas de luz, o watt e o quilowat-hora são normalmente associados à energia eléica Enretanto, podem ser usados para medir ouras formas de potência e energia. Se vcê apanha um livo no chão e o coloca sobre uma mesa, pode

dizer que realizou um rabalho, digamos, de 4 X 100 kW · h (ou 4 mW · h).

Também podemos expressar a taxa com a qual uma força realiza rabalho sobre

uma parícula (ou um objeto que se comporta como uma partícula) em termos da

força e da velocidade da partícula. Para uma partícula que se move em linha reta (ao

longo do eixo *x*, digamos) sob a ação de uma força *F* que faz um ângulo p com a direção de movimento da parícula, a Eq. 7-43 se torna

***P* _ *dW* _ *F* cos , *dx* _**

-

(*dx)*

***dt* -**

df

- *Fcos* > *dt* '

ou

***P* = *Fv* cos ,.**

(7-47)

Escrevendo o lado direito da Eq. 7-47 como o produto escalar F · *v*, a equação se

tona

***P* = *F* • *v* (o1ênda inslantânu).**

(7-48)

Assim, por exemplo, o caminhão da Fig. 7-13 exerce uma força *F* sobre a carga que está sendo rebocada, que tem velocidade v em um certo instante. A potência

-

-

instantânea desevolvida por *F* é a taxa com a qual *F* realiza rabalho sobre a carga nesse instante e é dada pelas Eqs. 7-47 e 7-48. Podemos dizer que essa potência é "a

potência do caminhão", mas devemos ter em mente o que isso signiica: potência é

a taxa com a qual *uma força* realiza trabalho.

Figua 7-13 A potência desenvolvida

TESTE 3

pela força aplicada à carga pelo

Um bloco descreve um movimento circular uniforme sob a ação de uma corda presa ao

caminhão é iual à axa com a qual a

bloco e ao cenro da trajeória. A potência desenvolvida pela força que a corda exerce soforça realiza rabalho sobre a carga.

bre o bloco é positiva, negativa ou nula?

(REGIAIN FREDERIC/Gama-Presse,

Inc.)

$K = \frac{1}{2}mv^2$

Exemplo

Potência, foça, velocidade

A Fig. 7-14 mosra as forças constantes i e ' 2 que agem

***P2* = *F2v* cos c> 2 = (4,0 N)(3,0 m/s) cos 60º**

sobre uma caixa enquanto desliza para a direita sobre um

= 6,0 W.

(Resposta)

piso sem arito. A força i é horizontal, de módulo 2,0 N;

a força F; está inclinada para cima de um ângulo de 60º em Este resultado positivo indica que a força . está *fornecen*

relação ao piso e tem um módulo de 4,0 N. A velocidade *do* energia à caixa à taxa de 6,0 J/s.

escalar *v* da caixa em um certo insante é 3,0 m/s. Quais

A potência total é a soma das duas potências:

são as potências desenvolvidas pelas duas forças que agem

P101 = *Pi* + *Pz*

sobre a caixa nesse instante? Qual é a potência total? A

= -6,0 W + 6,0 W = O,

(Resposta)

potência total está variando nesse instante?

que nos diz que a axa total de ransferência de energia é

IDEIA-CHAVE

zero. Assim, a energia cinética *(K* = { *mv2)* da caixa não

Estamos interessados na potência instantânea e não na está variando e a velocidade da caixa continua a ser 3,0

- -

potência média em um intervalo de tempo. Além disso, m/s. Como as forças F; e F; e a velocidade i não variam, conhecemos a velocidade da caixa e não o trabalho reali vemos pela Eq. 7-48 que *P* 1 e *P* 2 são constantes e o mesmo zado sobre a caixa.

acontece com P, *0r*

***Cálulo* Usamos a Eq. 7-47 duas vezes, uma para cada**

força. Para a força ;, que faz um ângulo *)1* com a velo—

Potência negativa.

Potência positiva.

2 com ave

desliza para a direia em um piso sem atrito. A velocidade da

locidade *v,* temos:

. , -

caixa e *v.*

REVISÃO E RESUMO

Energia Cinética A eneria cinética *K* associada ao movimento Trabalho e Energia Cinética No caso de uma partícula, uma de uma partícula de massa *me* velocidade escalar *v,* onde *v* é muito variação *(* da energia cinéica é iual ao rabalho toal *W* realizamenor que a velocidade da luz, é dada por do sobre a partícula:

(energia cinética).

(7-1)

.*K* = *K* - *K;*

1

= *W* (teorema do trabalho e energia cinética), (7-10)

onde K; é a energia cinética inicial da partícula e K

Trabalho Trabalho *W* é a energia transferida para um objeto

***1* é a energia cinética da partícula após o rabalho ter sido realizado. De acordo**

ou de um objeto por uma força que age sobre o objeto. Quando o com a Eq. 7 -10, temos:

objeto recebe energia, o trabalho é posiivo; quando o objeto cede

energia, o rabalho é negativo.

***K*1= *K*, + *W*.**

(7-11)

Trabalho Realizado por uma Força Constante O trabalho Trabalho Realizado pela Força Gravitacional O trabalho *W8*

realizado sobre uma partícula por uma força constante *F* durante

-

realizado pela força gravitacional *F8* sobre uma parícula (ou um

um deslocamento d é dado por

objeto que se comporta como uma partícula) de massa *m* durante

-· -

-

um deslocamento *d* é dado por

***Ht* = *Fd* os > = *F* · *d* (trabalho. força constante). (7-7, 7-8) WR = *ngd* cos <p,**

(7-12)

onde > é o ânulo constante entre *F* e *d*. Apenas a componente de *P* na direção do deslocamento *d* realiza rabalho sobre o objeto. onde > é o ânulo enre *Fc* e J.

Quando duas ou mais forças agem sobre um objeto, o trabalho total

é a soma dos trabalhos realizados pelas forças, que também é igual Trabalho Realizado para Levantar e Baixar um Objeto O

ao rabalho que seria realizado pela força resultante *Fe*,·

trabalho W^a realizado por uma força aplicada quando um objeto que

PARTE 1

ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO

se comporta como uma partícula é levantado ou baixado está relacio Trabalho Realizado por uma Força Variável Quando a força nado ao trabalho Wx realizado pela força gravitacional e à variação F aplicada a um objeto que se comporta como uma partícula depen1K da energia cinética do objeto aravés da equação de da posição do objeto, o trabalho realizado por F sobre o objeto

AK = Kr - K, = W,, + W,.

(7-15) enquanto o ojeto se move de uma posição inicial r; de coordenadas

onde *d* é o deslocamento da extremidade livre da mola em relação

à posição que ocupa quando a mola esá no estado relaxado (nem

W *L"'*

= *F(x) dx*.

(7-32)

comprimida nem alongada) e *k* é a constante elásica (uma medida

***x*,**

da rigidez da mola). Se um eixo x é traçado ao longo do comprimento

da mola, com a origem na posição da extremidade livre da mola no Potência A potência desenvolvida por uma força é a taxa com a estado relaxado, a Eq. 7-20 pode ser escrita na forma

qual a força realiza trabalho sobre um objeto. Se a força realiza um

***F*, - *kx* (lei de Hoke).**

(7-21) trabalho W em um intervalo de tempo 1t, a *potência* média desenvolvida pela força nesse inervalo de tempo é dada por A força elástica é, portanto, uma força variável: ela varia com o

deslocamento da extremidade livre da mola.

w

Pmd = ili .

(7-42)

Tabalho Realizado por uma Força Elástica Se um objeto Potência instantânea é a taxa insantânea com a qual o trabalho está está preso à extremidade livre de uma mola, o rabalho W, realizado sendo realizado:

A

v

4 Em três situações, uma força horizontal aplicada brevemente

= 3i-4j, (e) *v* = 5i e () *v* = 5 *ls* a 30º com a horizontal.

muda a velocidade de um disco de metal que desliza sobre uma su2 A Fig. 7-15amostra duas forças horizonais que agem sobre um perície de gelo de arito desprezível. As vistas superiores da Fig.

bloco que está deslizando para a direita sobre um piso sem atrito. A 7-16 mostram, para cada situação, a velocidade inicial *V;* do disco, Fig. 7-15b mostra rês gráicos da energia cinética *K* do bloco em a velocidade final v1e as orientações dos vetores velocidade corresfunção do tempo *t.* Qual dos gráficos corresponde melhor às três pondentes. Ordene as situações de acordo com o rabalho realizado seguintes situações: (a) *F1 = F2,* (b) F1 > *F2,* (c) F1 < *F2?*

sobre o disco pela força aplicada, do mais positivo para o mais negativo.

K

-

-

y

'

y [illegible] 4 1n/s

Ó1= 5 m/s

F1

i

F_1
x_1
x

F_x
F_1
x_1
x

F_1

F_2
F_1
$-F_1$
$-F_2$
1 2 3 4 5 6 7 8
x (m)

(b)
(c)

A
B
t
C
D
E
F
t
t
t
t
t
t

5 A Fig. 7-17 mostra quaro gráficos (raçados na mesma escala) 8 A Fig. 7-20a mostra quaro siuações nas quais uma força horida componente F_x de uma força variável (dirigida ao longo de um zontal age sobre um mesmo bloco, que esá inicialmente em repouso.

eixo *x)* em função da posição *x* de uma partícula sobre a qual a força Os módulos das forças são $F_2 = F_4 = 2F_1 = 2F_3$• A componente atua. Ordene os gráficos de acordo com o rabalho realizado pela horizontal v, da velocidade do bloco é mostrada na Fig. 7-20b para força sobre a partícula de *x* = O a *x* = x_1, do mais positivo para o as quatro situações. (a) Que gráfico da Fig. 7-20b melhor coresmais negativo.

ponde a que força da Fig. 7 -20a? (b) Que grico da Fig. 7 -20c (da

energia cinética *K* em função do tempo *t)* melhor corresponde a que gráfico na Fig. 7-20b?

-

-

-

F_2

R

F_4

1

X

.

X

F ------

1

t

XJ *X*

X

G

I

H

-F ___ .

- F

(e)

1

1

()

(b)

(e)

Figura 7-17 Pergunta 5.

Figura 7-20 Pergunta 8.

6 A Fig. 7-18 mosra a componen9 A mola *A* é mais rígida que a mola *B* *(k., > k8)*. A força elástica te *F,* de uma força que pode agir

de que mola realiza mais trabalho se as molas são comprimidas (a)

sobre uma partícula. Se a parícula

de uma mesma distância e (b) por uma mesma foça?

parte do repouso em *x* = O, qual é

10 Uma bola é arremessada ou deixada cair a partir do repouso

sua coordenada quando (a) a ener . *X*

da borda de um precipício. Qual dos ráicos na Fig. 7-21 poderia

gia cinéica é máxima, b) a veloc i mostrar como a energia cinética da bola varia durante a queda?

dade é máxima e (c) a velocidade é

nula? (d) Qual é o sentido da velo

K

K

K

K

cidade da partícula ao passar pelo Figura 7-18 Pergunta 6.

pontox = 6 m?

7 Na Fig. 7-19, um porco ensebado pode escolher enre três escorregas para descer. Ordene os escorregas de acordo com o trabalho que a força

PARTE 1

ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO

165

1

P R O B L E M A S

• -- O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponívei s em O *Cico Voador da Físca* de Jeart Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 7-3 Energia Cinética

Seção 7-5 Trabalho e Energia Cinétia

•1 Um próton (massa *m* = 1,67 X 10·27 kg) está sendo acelerado •7 Um corpo de 3,0 kg esá em repouso sobre um colchão de ar h o em linha reta a 3,6 X 1015 m/s2 em um acelerador de parículas . Se rizontal de arito desprezível quando uma força horizonal constante o próton tem uma velocidade inicial de 2,4 X 107 m/s e se desloca F é aplicada no instante *t* = O. A Fig. 7-24 mosra, em um gráico 3,5 cm, determine (a) a velocidade e b) o aumento da energia c i estroboscópico, a posição da partícula a intervalos de 0,50 s. Qual nética do próton.

é o trabalho realizado sobre o corpo pela força F no intervalo de

•2 Se um foguete Satuno V e uma espaçonave Apolo acoplada ao *t* = O a *t* = 2,0 s?

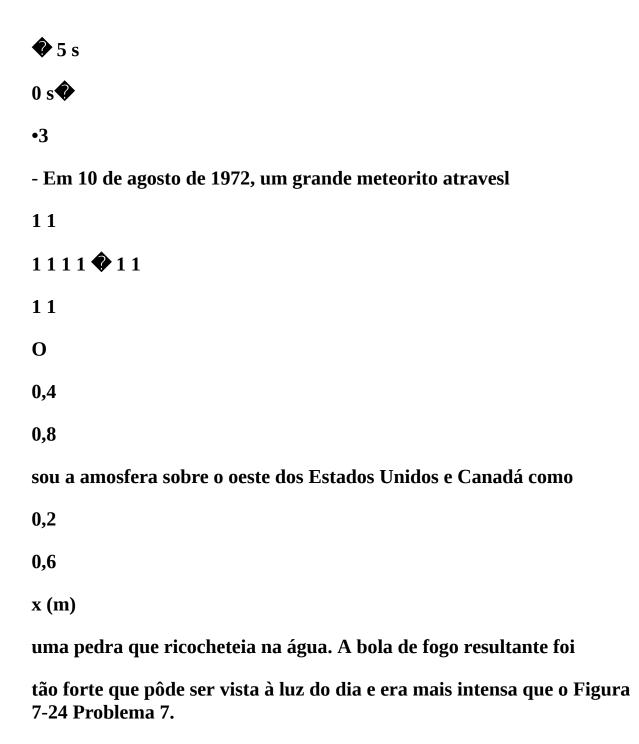
foguete tinham uma massa total de 2,9 X l5 kg, qual era a energia

cinética quando atingiram uma velocidade de 1 1,2 kmls?

Í1-o,s s

l,

l,

2,

 Os

A

A

tivesse entrado verticalmente na amosfera terrestre, teria atingido aplica ao bloco uma força *F* = (210 N)i - (150 N)j, fazendo com

-

A

A

a superfície da Terra com aproximadamente a mesma velocidade. que o bloco sofra um deslocamento *d* = (15 m)i -(12 m)j. Qual (a) Calcule a perda de energia cinética do meteorito (em joules) é o trabalho realizado pela força sobre o bloco durante o deslocaque estaria associada ao impacto vertical. (b) Expresse a energia mento?

como um múltiplo da energia explosiva de 1 megaton de TNT, •9 A única força que age sobre uma lata de 2,0 kg que está se mo4,2 X 1015 J. (c) A energia associada à explosão da bomba atômi vendo em um plano *y* tem um módulo de 5,0 N. Inicialmente, a ca de Hiroshima foi equivalente a 13 quilotons de TNT. A quantas lata tem uma velocidade de 4,0 *mls* no sentido positivo do eixo *x;*

bombas de Hiroshima o impacto do meteorito seria equivalente?

em um instante posterior, a velocidade passa a ser 6,0 m/s no senti

••4 Uma conta com uma massa de 1,8 X 10-2kg está se movendo do positivo do eixo *y.* Qual é o trabalho realizado sobre a lata pela no senido posiivo do eixo *x.* A partir do instante *t* = O, no qual força de 5,0 N nesse intervalo de tempo?

a conta está passando pela posição *x* = O com uma velocidade de • 1 O Uma moeda desliza sobre um plano sem arito em um sistema 12 m/s, uma força constante passa a agir sobre a conta. A Fig. 7-22 de

coordenadas *y*, da origem até o ponto de coordenadas (3,0 m, mosra a posição da conta nos instantes *t0* = O, t = 1,0, *t*

4,0 m), sob o efeito de uma força constante. A força tem um módu

1

***2* = 2,0 e**

***t3* = 3,0 s. A conta para momentaneamente em *t* = 3,0 s. Qual é a lo de 2,0 N e faz um ângulo de 100º no sentido ani-horário com o energia cinética da conta em *t* = 10 s?**

semieixo *x* positivo. Qual é o trabalho realizado pela força sobre a

moeda durante esse deslocamento?

/3

o

1 1

•• 1 1 Uma força de 12,0 N e orientação ixa realiza rabalho s o 5

10

15

20

bre uma partícula que sofre um deslocamento a = (2, ooI - 4, oo} +

x (m)

A

3, OOk) m. Qual é o ângulo entre a força e o deslocamento se a varia-

Figura 7-22 Problema 4.

ção da energia cinética da parícula é (a) +30,0 J e b) -30,0 J?

••12 Uma lata de parafusos e porcas é empurada por 2,00 m ao

• •5 Em uma corrida, um pai tem metade da energia cinética do i longo de um eixo x por uma vassoura sobre um piso sujo de óleo lho, que tem metade da massa do pai. Aumentando a velocidade em (sem atrito) de uma oicina de automóveis. A Fig. 7-25 mostra o 1,0 m/s, o pai passa a ter a mesma energia cinética do ilho. Qual é trabalho W realizado sobre a lata pela força horizontal constante da a velocidade escalar inicial (a) do pai e (b) do ilho?

vassoura em função da posição x da lata. A escala vertical do grái

• •6 Uma força , é aplicada a uma cona quando esta se move em co é deinida por W, = 6,0 J. (a) Qual é o módulo da força? (b) Se linha reta, sofrendo um deslocamento de +5,0 cm. O módulo de , a lata tivesse uma energia cinética inicial de 3,00 J, movendo-se no é mantido constante, mas o ângulo > enre f. e o deslocamento da sentido posiivo do eixo x, qual seria a energia cinética ao nal do conta pode ser escolhido. A Fig. 7-23 mosra o rabalho W realizado deslocamento de 2,00 m?

por , sobre a conta para valores de > dentro de um certo intervalo;

$W0$ = 25 J. Qual é o trabalho realizado por f. se > é igual a (a) 64 º

e b) 147º?

o

l

2

X (1n)

Figura 7-23 Problema 6.

Figura 7-25 Problema 12.

$\vec{F_3}$
$\vec{F_1}$
θ_3
x
θ_2
$\vec{F_2}$

$\vec{F_r}$
d
θ

$\vec{F_2}$
θ

K_0

K_s
K (J)

CAPÍTULO 7

••13 Um trenó e seu ocupante, com uma massa total de 85 kg, do oceano. A aceleração da astronauta é g/10. Qual é o rabalho descem uma encosta e aingem um recho horizontal reilíneo com realizado sobre a asronauta (a) pela força do helicóptero e (b) pela uma velocidade de 37 m/s. Se uma força desacelera o trenó até o força gravitacional? Imediatamente antes de a astronauta chegar repouso a uma taxa constante de 2,0 m/s2, determine (a) o módulo ao helicóptero, quais são (c) sua energia cinética e (d) sua veloci

***F* da força, (b) a distância *d* que o renó percorre até parar e (c) o dade?**

rabalho *W* realizado pela força sobre o renó. Quais são os valores •18

- (a) Em 1975, o teto do velódromo de Montreal, com

de (d) *F,* (e) *d* e () *W,* se a taxa de desaceleração é 4,0 m/s2?

um peso de 360 kN, foi levanado 10 cm para que pudesse ser cen

•• 14 A Fig. 7-26 mosra uma vista supeior de rês forças horizon tralizado. Que rabalho foi realizado sobre o teto pelas forças que o tais auando sobre uma caixa que estava inicialmente em repouso e ergueram? (b) Em 1960, uma mulher de Tampa, na Flórida, levanpassou a se mover sobre um piso sem arito. Os módulos das forças tou uma das extremidades de um carro que havia caído sobre o filho são F1 = 3,00 N, *F2* = 4,00N, e F3 = 10,0N e os ângulos indicados quando o macaco quebrou. Se o desespero a levou a levanar 4000

são 8 =

=

2

50,0º e 8 *3* 35,0º. Qual é o abalho total realizado sobre N (cerca de 1/4 do peso do carro) por uma distância de 5,0 cm, que a caixa pelas três forças nos primeiros 4,00 m de deslocamento?

trabalho a mulher realizou sobre o carro?

••19 Na Fig. 7-29, um bloco de gelo escorega para baixo em uma

y

rampa sem arito com uma inclinação 8 = 50° enquanto um operário puxa o bloco (através de uma corda) com uma força F, que tem um módulo de 50 N e apona para cima ao longo da rampa. Quando

o bloco desliza uma distância *d* = 0,50 m ao longo da rampa, sua

energia cinéica aumenta 80 J. Quão maior seria a energia cinética

se o bloco não estivesse sendo puxado por uma corda?

Figura 7-26 Problema 14.

• • 15 A Fig. 7-27 mosra rês forças aplicadas a um baú que se desloca 3,00 m para a esquerda sobre um piso sem arito. Os módulos das forças são F1 = 5,00 N, *F2* = 9,00 N e *F3* = 3,00 N; o ângulo indicado é 8 = 60º. No deslocamento, (a) qual é o trabalho total

realizado sobre o baú pelas três forças e (b) a energia cinéica do Figura 7-29 Problema 19.

baú aumenta ou diminui?

• •20 Um bloco é lançado para cima em uma rampa sem atrito,

ao longo de um eixo *x* que aponta para cima. A Fig. 7-30 mostra a

energia cinética do bloco em função da posição *x;* a escala vertical

do ráico é deinida por *K,* = 40,0 J. Se a velocidade inicial do

bloco é 4,00 m/s, qual é a força normal que age sobre o bloco?

- *Fg*

Figura 7-27 Problema 15.

••16 Um objeto de 8,0 kg está se movendo no sentido positivo de

um eixo *x*. Quando passa pelo ponto *x* = O, uma força consante

dirigida ao longo do eixo passa a atuar sobre ele. A Fig. 7-28 moso

1

2

a a energia cinéica *K* em unção da posição *x* quando o objeto se Figura 7-30 Problema 20.

X (m)

desloca de *x* = O a *x* = 5,0 m; *K0* = 30,0 J. A força continua a agir.

Qual é a velocidade do objeto no instante em que passa pelo ponto ••21 Uma corda é usada para baixar verticalmente um bloco de

***X* = -3,0m?**

massa *M*, inicialmente em repouso, com uma aceleração consante

para baixo de *g/4*. Após o bloco descer uma distância *d*, determine

***K* (J)**

(a) o rabalho realizado pela força da corda sobre o bloco, (b) o trabalho realizado pela força gravitacional sobre o bloco, (c) a energia cinética do bloco; (d) a velocidade do bloco.

••22 Uma equipe de salvamento retira um espeleólogo ferido do

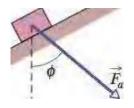
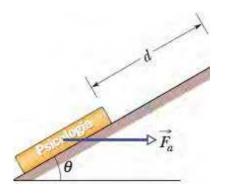
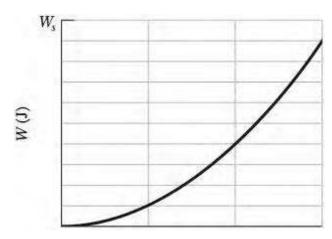
fundo de uma cavena com o auxHio de um cabo ligado a um mo

Figura 7-28 Problema 16.

o

S *X* (m) tor. O resgate é realizado em rês etapas, cada uma envolvendo uma distância vertical de 10,0 m: (a) o espeleólogo, que estava inicialmente em repouso, é acelerado até uma velocidade de 5,00 m/s; Seção 7-6 Trabalho Realizado pela Força Gravitacional

(b) é içado com velocidade constante de 5,00 m/s; (c) inalmente,

•17 Um helicóptero levanta verticalmente, por meio de um cabo, é desacelerado até o repouso. Qual é o rabalho realizado em cada uma astronauta de 72 kg até uma altura 15 m acima da superfície etapa sobre o espeleólogo de 80,0 kg?

PARTE 1

••23 Na Fig. 7-31, uma força consante F. de módulo 82,0 N é pela mola sobre o bloco quando este se desloca de *X;* = + 5,0 cm aplicada a uma caixa de sapatos de 3,00 kg a um ângulo , = 53,0º, para (a) *x* = +3,0 cm, (b) *x* = -3,0 cm, (c)x = *-5,0* cm e (d) *x* =

fazendo com que a caixa se mova para cima ao longo de uma rampa -9,0 cm?

sem atrito com velocidade consante. Qual é o rabalho realizado •28 Durante o semestre de primavera do MT, os estudantes de sobre a caixa por F *0* após a caixa ter subido uma distância verical dois dormitórios vizinhos travam batalhas com grandes caapultas

***h* = 0,150 m?**

feitas com meias elásticas monadas na moldura das janelas. Um

balão de aniversário cheio de água colorida é colocado em uma

bolsa presa na meia, que é esticada até a outra exremidade do

quarto . Suponha que a meia esticada obedece à lei de Hooke com

uma constante elástica de 100 N/m. Se a mangueira é esticada

5,00 me liberada, que rabalho a força elástica da meia realiza sobre

a bola quando a meia volta ao comprimento normal?

Figura 7-31 Problema 23.

••29 No arranjo da Fig. 7-9, puxamos gradualmente o bloco de

***x* = O até *x* = + 3,0 cm, onde fica em reouso. A Fig. 7-34 mostra o**

••24 Na Fig. 7-32, uma força horizontal . de módulo 20,0 N é trabalho que nossa força realiza sobre o bloco. A escala vertical do aplicada a um livro de psicologia de 3,00 kg enquanto o livro es gráico é deida por *W,* = 1,0 J. Em seguida, puxamos o bloco até correga por uma distância *d* = 0,500 m ao longo de uma rampa de *x* = + 5,0 cm e o liberamos a partir do repouso. Qual é o rabalho reinclinação 8 = 30,0º, subindo sem atrito . (a) Neste deslocamento, alizado pela mola sobre o bloco quando este se desloca de *X;* = + 5 ,O

qual é o trabalho total realizado sobre o livro por F *0*, pela força cm até (a) *x* = +4,0 cm, (b) *x* = -2,0 cm e (c) *x* = -5,0 cm?

gravitacional e pela força normal? (b) Se o livro tem energia cinética nula no início do deslocamento, qual é sua energia cinética final?

Figura 7-32 Problema 24.

o

1

2

3

***x* (c1n)**

••25 Na Fig. 7-33, um pedaço de queijo de 0,250 kg repousa no Figura 7-34 Problema 29.

chão de um elevador de 900 kg que é puxado para cima por um cabo,

primeiro por uma distância d1 = 2,40 m e depois por uma distân • •30 Na Fig. 7-9a, um blco de massa *m* repousa em uma supeície cia i = 10,5 m. (a) No deslocamento d1, se a força normal exerci horizonal sem aito e está preso a uma mola horizontal (de consanda sobre o bloco pelo piso do elevador tem um módulo constante te elástica k) cuja oura exremidade é manida xa. O bloco esá em *FN* = 3,00 N, qual é o trabalho realizado pela força do cabo sobre [illegible] na posição onde a mola está

relaxada *(x* = O) quando uma o elevador? (b) No deslocamento *d2,* se o trabalho realizado sobre força *F* no senido psitivo do eixo *x* é aplicada. A Fig. 7-35 mosa o elevador pela força (constante) do cabo é 92,61 kJ, qual é o mó o ráico da eneria cinéica do bloco em unção da posição *x* após dulo de FN?

a aplicação da força. A escala verical do grico é deida por *K,* =

4,0 J. (a) Qual é o módulo de *F?* (b) Qual é o valor de k:?

K,

: ºo

Figura 7-33 Problema 25.

n

0,5

1

1,5

2

Figura 7-35 Problema 30.

***X* (m)**

Seção 7-7 Trabalho Realizado por uma Força Elástica

••31 A única força que age sobre um corpo de 2,0 kg enquanto

•26 Na Fig. 7-9, devemos aplicar uma força de módulo 80 N para se move no semieixo positivo de um eixo *x* tem uma componente manter o bloco esacionário em *x* = -2,0 cm. A parir dessa posi

Fx = *-6xN,* comxemmetros. A velocidade do corpo emx = 3,0 m

ção, deslocamos o bloco lentamente até que a força aplicada realize é 8,0 m/s. (a) Qual é a velocidade do corpo em *x* = 4,0 m? (b) Para um rabalho de +4,0 J sobre o sistema massa-mola. A partir desse que valor positivo de *x* o corpo tem uma velocidade de 5,0 m/s?

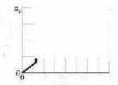
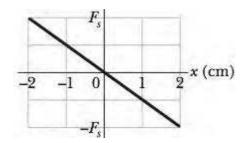
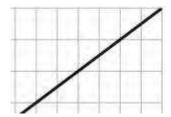
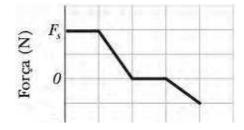
instante, o bloco permanece em repouso . Qual é a posição do bloco? ••32 A Fig. 7-36 mosra a força elástica F

(Sugestão: **existem duas respostas possíveis.)**

x em função da posiçãox

para o sistema massa-mola da Fig. 7-9. A escala verical do gráico

•27 Uma mola e um bloco são montados como na Fig. 7-9. Quan é deinida por *F*, = 160,0 N. Puxamos o bloco até *x* = 12 cm e o do o bloco é puxado para o ponto *x* = +4,0 cm, devemos aplicar liberamos. Qual é o abalho realizado pela mola sobre o bloco ao uma força de 360 N para mantê-lo nessa posição. Puxamos o bloco se deslocar de *X;* = +8,0 cm para (a) *x* = +5,0 cm, (b) *x* = -5,0

para o ponto *x* = 11 cm e o liberamos. Qual é o trabalho realizado cm, (c) *x* = -8,0 cm e (d) *x* = -10,0 cm?

F X

eixo *x*, a partir do repouso, de *x* = O a *x* = 9,0 m. A escala vertical do gráico é deinida por as = 6,0 m/s2• Qual é o trabalho realizado

pela força sobre a partícula até a partícula atingir o ponto (a) *x* =

4,0 m, (b) x = 7,0 m e (c) x = 9,0 m? Quais são o módulo e o sentido da velocidade da partícula quando ela atinge o ponto (d) x =

4,0 m, (b) x = 7,0 me (c) x = 9,0 m?

Figura 7-36 Problema 32.

***as* -**

.

•••33 O bloco na Fig. 7-9a está sobre uma superfície horizontal

.

s o

sem atrito e a constante elástica é 50 N/m. Inicialmente, a mola está

'

'

4 '

2

'

'

X (m)

relaxada e o bloco está parado no ponto

"

x = O. Uma força com mó

[illegible]

dulo consante de 3,0 N é aplicada ao bloco, puxando-o no sentido

-

positivo do eixo *x* e alongando a mola até o bloco parar. Quando

-a s

·-

.

este ponto é atingido, qual é (a) a posição do bloco, (b) o trabalho Figura 7-39 Problema 37.

realizado sobre o bloco pela força aplicada e (c) o rabalho realizado

sobre o bloco pela força elásica? Durante o deslocamento do bloco,

qual é (d) a posição do bloco na qual a energia cinética é máxima e ••38 Um bloco de 1,5 kg está em repouso sobre uma superfície (e) o valor desta energia cinéica máxima?

horizontal sem atrito quando uma força ao longo de um eixo *x* é

-

A

aplicada ao bloco. A força é dada por *F(x)* = (2,5-x2)i N, onde

Seção 7-8 Trabalho Realizado por uma Força

***x* está em meros e a posição inicial do bloco é *x* = O. (a) Qual é a Variável Genérica**

energia cinética do bloco ao passar pelo ponto *x* = 2,0 m? (b) Qual

é a energia cinética máxima do bloco entre *x* = O e x = 2,0 m?

•34 Um tijolo de 10 kg se move ao longo de um eixo *x.* A Fig.

-

A

-

7-37 mosra a aceleração do tijolo em função da posição. A escala ••39 Uma força *F = (ex-3,00x2)i, onde F esá em newtons, x*

vertical do gráico é deinida por a

em metros e e é uma constante, age sobre uma parícula que sedess = 20,0 m/s2• Qual é o trabalho total realizado sobre o tijolo pela força responsável pela aceleração loca ao longo de um eixo x. Em x = O, a energia cinética da partícula quando o tijolo se desloca de x = O para x = 8,0 m?

é 20,0 J; emx = 3,00m, é 11,0 J. Determine o valor de e.

• •40 Uma lata de sardinha é deslocada ao longo de um eixo x., de

x = 0,25 m até x = 1,25 m, por uma força cujo módulo é dado por

F = e4x', com x em metros e F em newtons. Qual é o trabalho realizado pela força sobre a lata?

••41 Uma única força aua sobre um objeto de 3,0 kg que se comporta oomo uma partícula, de tal forma que a posição do objeto em função do tempo é dada por x = 3,0t- 4,0t2 + 1,0t3, com x em 2

4

6

8

metros e t em segundos. Determine o trabalho realizado pela força

X (m)

sobre o objeto de t = O a t = 4,0 s.

Figura 7-37 Problema 34.

•••42 A Fig. 7-40 mostra uma corda presa a um carrinho que pode

•35 A força a que uma partícula está submetida aponta ao longo deslizar sobre um rilho horizonal sem atrito ao longo de um eixo

x.

de um eixo x e é dada por F = F

A exremidade esquerda da corda é puxada através de uma polia

0(xlx0 - 1). Determine o trabalho

realizado pela força ao mover a partícula de x = O a x =

de massa e atrito desprezíveis a uma alura h = 1,20 m em relação

x0 de duas

formas: (a) plotando F(x) e medindo o trabalho no gráico; (b) inte ao ponto onde está presa no carrinho, fazendo o carrinho deslizar rando F(x).

de x1 = 3,00 m até Xi = 1,00 m. Durante o deslocamento, a tensão

da corda se mantém constante e igual a 25,0 N. Qual é a variação

•36 Um bloco de 5,0 kg se move em uma linha reta sobre uma da energia cinética do carrinho durante o deslocamento?

superfíci e horizontal sem arito sob a luência de uma força que

varia com a posição, como mostra a Fig. 7-38. A escala verical do

y

em repouso. Calcule o rabalho realizado pela força (a) no primeiro,

••37 A Fig. 7-39 mosra a aceleração de uma partícula de 2,00 kg (b) no segundo e (c) no terceiro segundo, assim como (d) a potência sob a ação de uma força F. que desloca a partícula ao longo de um instantânea da força no im do terceiro segundo.

•44 Um esquiador é puxado por uma corda para o alto de uma en
Problemas Adicionais

costa que faz um ângulo de 12º com a horizontal. A corda se move 53 A Fig. 7-41 mostra um pacote de cachorros paralelamente à encosta com uma velocidade constante de 1,0 m/s.

-quentes escorregando para a direita em um piso sem atrito por uma distância

A força da corda realiza 900 J de trabalho sobre o esquiador quan d = 20,0 cm enquanto três forças agem sobre o pacote. Duas são do este percorre uma distância de 8,0 m encosta acima. (a) Se a ve horizontais e têm módulos F

locidade constante da corda fosse 2,0 m/s, que trabalho a força da

1 = 5,00 N e F2 = 1,00 N; a terceira

faz um ângulo) = 60,0º para baixo e tem um módulo F3 = 4,00 N.

corda teria realizado sobre o esquiador para o mesmo deslocamen (a) Qual é o trabalho total realizado sobre o pacote pelas três forças to? A que taxa

a força da corda realiza trabalho sobre o esquiador mais a força gravitacional e a força nomal? (b) Se o pacote tem uma quando a corda se desloca com uma velocidade de (b) 1,0 m/s e (c) massa de 2,0 kg e uma energia cinética inicial igual a zero, qual é 2,0 m/s?

sua velocidade no inal do deslocamento?

•45 Um bloco de 100 kg é puxado com velocidade constante de

5,0 m/s sobre um piso horizontal por uma força de 122 N que faz

- -

d- - - -i

-

um ângulo de 37º acima da horizontal. Qual é a taxa com a qual a

.

força realiza trabalho sobre o bloco?

1

•46 Um elevador carregado tem uma massa de 3,0 X 103 kg e

sobe 210 m em 23 s, com velocidade constante. Qual é a taxa média com a qual a força do cabo do elevador realiza trabalho sobre o elevador?

Figura 7-41 Problema 53.

••47 Uma máquina transporta um pacote de 4,0 kg de uma

-

A

A

A

posição inicial d; = (O, 50 m)i + (O, 75 m)j + (0,20 m)k em t = O 54 A única força que age sobre um corpo de 2,0 kg quando o corpo

-

A

A

A

até uma posição final d, =(7,50m)i +(12,0m)j+(7,20 m)k em se desloca ao longo de um eixo x varia da forma indicada na Fig.

t = 12 s. A força constante aplicada pela máquina ao pacote é 7-42. A escala vertical do gráico é deida por F, = 4,0 N. Av e

-

A

A

A

F = (2,00 N)i +(4,00 N)j + (6,00 N)k. Para esse deslocamento, locidade do corpo em x = O é 4,0 m/s. (a) Qual é a energia cinética determine (a) o trabalho realizado pela força da máquina sobre o do corpo emx = 3,0 m? b) Para que valor dexo corpo possui uma pacote e (b) a potência média dessa força.

energia cinética de 8,0 J? (c) Qual é a energia cinética máxima do

••48 Uma bandeja de 0,30 kg escorrega sobre uma superfície ho corpo entrex = O ex = 5,0 m?

rizontal sem atrito presa a uma das exremidades de uma mola horizontal (k = 500 N/m) cuja outra extremidade é mantida ixa. A F, (N)

bandeja possui uma energia cinética de 10 J ao passar pela posição

de equiHbrio (ponto em que a força elásica da mola é zero). (a) Com

F, l 1 I

Ü -.'--+1--< X (m)

que axa a mola esá realizando trabalho sobre a bandeja quando

esta passa pela posição de equilíbrio? (b) Com que taxa a mola está

realizando rabalho sobre a bandeja quando a mola está comprimida

de 0,10 m e a bandeja esá se afastando da posição de equilíbrio?

Figura 7-42 Problema 54.

• •49 Um elevador de carga totalmente carregado tem uma massa

total de 1200 kg, que deve içar 54 m em 3,0 min, iniciando e terminando a subida em repouso. O contrapeso do elevador em uma 55 Um cavalo puxa uma carroça com uma força de 40 lb que massa de apenas 950 kg e, portanto, o motor do elevador deve ajudar . faz um ângulo de 30º para cima com a horizontal e se move com Que potência média é exigida da força que o motor exerce sobre o uma velocidade de 6,0 mi/h. (a) Que trabalho a força realiza em elevador através do cabo?

10 min? (b) Qual é a potência média desenvolvida pela força em

horsepower?

••50 (a) Em um certo instante, um objeto que se comporta como

-

A

A

uma partícula

56 Um objeto de 2,0 kg inicialmene em repouso acelera unifo r

A

sofre a ação de uma força F = (4, O N) i -(2, O N) j +

A

A

(9, O N)k quando sua velocidade é v = - (2, O m/s)i + (4,0 m/s)k . memente na horizontal até uma velocidade de 10 m/s em 3,0 s. (a) Qual é a taxa instantânea com a qual a força realiza trabalho sobre Nesse intervalo de 3,0 s, qual é o rabalho realizado sobre o objeto o objeto? (b) Em outro instante, a velocidade tem apenas a com pela força que o acelera? Qual é a potência instantânea desenvolvida ponene y. Se a força não muda e a potência instantânea é -12 W, pela força (b) no im do intervalo e (c) no im da primeira metade qual é a velocidade do objeto nesse instante?

do intervalo?

••51 Uma força F = (3,00 N)i +(7,00 N)] +(7,00 N)kagesobre 57 Um caixote de 230 kg está pendurado na extremidade de uma um objeto de 2,00 kg que se move de uma posição inicial ai = corda de comprimento L = 12,0 m. Você empurra o caixote hori

A

A

A

-

(3,00 m)i -(2,00 m)j +(5,00 m)k para uma posição inal d, = zontalmente com uma força variável F, deslocando-o para o lado A

A

A

-(5,00 m)i + (4,00 m)j + (7,00 m)k em 4,00 s. Determine (a) o de uma distância d = 4,00 m (Fig. 7-43). (a) Qual é o módulo de rabalho realizado pela força sobre o objeto no intervalo de 4,00 s, F quando o caixote está na posição inal? Neste deslocamento, quais (b) a potência média desenvolvida pela força nesse intervalo e (c) são (b) o trabalho toal realizado sobre o caixote, (c) o rabalho reao ângulo entre os vetores d; e d1.

lizado pela força gravitacional sobre o caixote e (d) o trabalho reali

•••52 Umanny car acelera a partir do repouso, percorrendo uma zado pela corda sobre o caixote? (e) Sabendo que o caixote esá em certa distância no tempo T, com o motor funcionando com potência repouso antes e depois do deslocamento, use as resposas dos itens constante P. Se os mecânicos conseguem aumentar a potência do (b), (c) e (d) para determinar o trabalho que a força F realiza sobre motor de um pequeno valor dP, qual é a variação do empo neces o caixote. () Por que o trabalho da força não é igual ao produto do sário para percorrer a mesma distância?

deslocamento horizontal pela resposa do item (a)?

L

mm
0
60

força de 209 N paralela ao plano inclinado. Quando o engradado

percorre 1,50 m, qual o rabalho realizado sobre ele (a) pela força

aplicada pelo trabalhador, b) pela força gravitacional e (c) pela força

normal? (d) Qual é o rabalho total realizado sobre o engradado?

64 Caixas são ransportadas de um local para outro de um armazém por meio de uma esteira que se move com uma velocidade consante de 0,50 m/s. Em um certo local, a esteira se move 2,0 m

ao longo de uma rampa que faz um ângulo de 10º para cima com

-- -

a horizontal, 2,0 m na horizonal e, finalmente, 2,0 m ao longo de

>F

uma rampa que faz um ângulo de 10º para baixo com a horizontal.

Figua 7-43 Problema 57.

[illegible] • 1

Suponha que uma caixa de 2,0 kg é transportada pela esteira sem

escorregar. Com que taxa a força da esteira sobre a caixa realiza

58 Para puxar um engradado de 50 kg sobre um piso horizontal trabalho quando a caixa se move (a) na rampa de 10º para cima, (b) sem arito, um operário aplica uma força de 210 N que faz um ân horizontalmente e (c) na rampa de 10º para baixo?

gulo de 20º para cima com a horizontal. Em um deslocamento de 65 Na Fig. 7-45, uma corda passa por duas polias ideais. Uma lata 3,0 m, qual é o rabalho realizado sobre o enradado (a) pela força de massa m = 20 kg está pendurada em uma das polias e uma força do operário, (b) pela força ravitacional e (c) pela força normal do F é aplicada à extremidade livre da corda. (a) Qual deve ser o mópiso? (d) Qual é o trabalho total realizado sobre o engradado?

dulo de F para que a lata seja levantada com velocidade constante?

59

Uma explosão no nível do solo produz uma cratera com (b) Qual deve ser o deslocamento da corda para que a lata suba 2,0

um diâmetro proporcional à raiz cúbica da energia da explosão; uma cm? Durante esse deslocamento, qual é o rabalho realizado sobre a explosão de 1 megaton de TNT deixa uma cratera de 1 km de diâ lata (c) pela força

aplicada (através da corda) e (d) pela força gravimetro. Sob o lago Huron, em Michigan, existe uma cratera com 50 tacional? (Sugestão: quando uma corda é usada da forma mosrada km de diâmero, aribuída ao impacto de um asteroide no passado na ira, a força total com a qual a corda puxa a segunda polia é remoto. Qual é a energia cinética associada a esse impacto, em ter duas vezes maior que a tensão da corda.) mos de (a) megatons de TNT (1 megaton equivale a 4,2 X 1015 J)

e (b) bombas de Hiroshima (uma bomba de Hiroshima equivale a

13 quilotons de TNT)? (Impactos de meteoritos e cometas podem

ter alterado siniicativamente o clima da Terra no passado e contribuído para a extinção de dinossauros e ouras formas de vida.) 60 Uma criança assusada desce por um escorrega de arito desprezível em um parque de diversões apoiada pela mãe. A força da

•

mãe sobre a criança é de 100 N para cima ao longo do escorega e

a energia cinética da criança aumenta de 30 J quando ela desce uma

•

distância de 1,8 m. (a) Qual é o rabalho realizado sobre a criança

pela força gravitacional durante a descida de 1,8 m? (b) Se a criança

-

não tivesse o apoio da mãe, qual seria o aumento da energia cinética

F

m

quando ela escorregasse a mesma distância de 1,8 m?

Figura 7-45 Problema 65.

-

A

A

61 Qual é o trabalho realizado por uma força F = (2x N)i + (3 N)j, 66 Se um carro com uma massa de 1200 kg viaja a 120 km/h em com x el} metros1 ao deslocar uma partícula _e uma posição uma rodovia, qual é a energia cinética do carro medida por alguém

; = (2 m)i +(3 m)j para uma posição [illegible] (4m)i -(3m)j?

que está parado no acostamento?

62 Um bloco de 250 g é deixado cair em uma mola vertical, inicial 67 Uma mola com um ponteiro está pendurada perto de uma régua mente relaxada, cuja constante elástica é k = 2,5 N/cm (Fig. 7-44). graduada em milímetros. Três pacotes diferentes são pendurados na O bloco fica acoplado à mola, comprimindo-a em 12 cm até parar mola, um de cada vez, como mosra a Fig. 7-46. (a) Qual é a marmomentaneamente. Nessa compressão, que trabalho é realizado ca da régua indicada pelo ponteiro quando não há nenhum pacote sobre o bloco (a) pela força gravitacional e b) pela força elástica? pendurado na mola? (b) Qual é o peso P do terceiro pacote?

(c) Qual é a velocidade do bloco imediatamente antes de se chocar

com a mola? (d) Se a velocidade no momento do impacto é duplicada, qual é a compressão máxima da mola?

mm0

+-1 0

'

PARTE 1

ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO

171

68 Um trenó à vela está em repouso sobre a superfície de um lago Um operário empurra o bloco para cima com uma força paralela ao congelado quando um vento repentino exerce sobre ele uma força plano inclinado, fazendo o bloco descer com velocidade constante.

constante de 200 N, na dirção leste. Devido ao ângulo da vela, o (a) Determine o módulo da força exercida pelo operário. Qual é o vento faz com que o trenó se desloque em linha reta por uma disân trabalho realizado sobre o bloco (b) pela força do operário, (c) pela cia de 8,0 m em uma direção 20º ao norte do leste. Qual é a energia força gravitacional, (d) pela força normal do plano inclinado e (e) cinética do renó ao inal desses 8,0 m?

pela força resultante?

69 Se um elevador de uma estação de esqui transporta 100 passa 77 Uma partícula que se move ao longo de um eixo x está submegeiros com um peso médio de 660 N até uma altura de 150 m em tida a uma força orientada no sentido positivo do eixo. A Fig. 7-48

60,0 s, com velocidade constante, que potência média é exigida da mostra o módulo F da força em função da posição x da partícula.

força que realiza este trabalho?

A curva é dada por F = a!x2, com a = 9,0 N · m2• Determine o

-

A

A

70 Uma força F = (4, ON)i + cj age sobre uma partícula enquanto trabalho realizado pela força sobre a partícula quando a partícula

-

A

A

a partícula sofre um deslocamento d = (3,0 m)i -(2,0 m)j. (Ou-se desloca de x = 1,0 m para x = 3,0 m (a) estimando o trabalho a ras forças também agem sobre a parícula.) Qual é o valor de e se partir do ráico e (b) integrando a unção da força.

o trabalho realizado sobre a partícula pela força F é (a) O, (b) 17 J

e (c) -18 J?

12

,-

' '

***71** Uma força constante de módulo 10 N faz um ângulo de 150º*

10

-

--

(no sentido antihorário) com o senido positivo do eixo x ao agir

-

-

sobre um objeto de 2,0 kg que se move em um plano

\

y. Qual é o

" "

1

rabalho realizado pela força sobre o objeto quando ele se move da

4

A

A

origem até o ponto cujo vetor posição é (2, O m)i -(4, O m) j?

. -

1

2

72 Na Fig. 7 -47a, uma força de 2,0 N, que faz um ângulo J para

1

1

baixo e para a direita com a horizontal, é aplicada a um bloco de

ºo

1

2

3

4

4,0 kg enquanto o bloco desliza 1,0 m para a direita em um piso

X (m)

horizontal sem arito. Escreva uma expressão para a velocidade v1 Figura 7-48 Problema 77.

do bloco após ser percorrida essa distância, para uma velocidade

inicial de (a) O e (b) 1,0 m/s para a direita. (c) A situação da Fig. 78 Uma caixa de CD escorrega em um piso no sentido positivo 7-47b é semelhante à do item (b), pois o bloco esá inicialmente se de um eixo x enquanto uma força aplicada , age sobre a caixa. A deslocando para a direita com uma velocidade de 1,0 m/s, mas agora força esá orientada ao longo do eixo x e a componente x é dada por a força de 2,0 N está dirigida para baixo e para a esquerda. Escreva Fax = 9x-3x2, comx em metros e Fax em newtons. A caixa parte do uma expressão para a velocidade v1do bloco após sr

percorrida uma repouso na posição x = O e se move até icar novamente em repouso.

distância de 1,0 m. (d) Plote as três expressões de v1em função do (a) Plote o trabalho realizado por , sobre a caixa em unção de x.

ângulo J, de J = O a J = 90º. Interprete os gráicos.

(b) Em que posição o trabalho é máximo e (c) qual é o valor deste

máximo trabalho? (d) Em que posição o trabalho se toma nulo? (e)

Em que posição a caixa ica novamente em repouso?

79 Uma merendeira de 2,0 kg escorrega em uma superfície sem

atrito no sentido positivo de um eixo x. A partir do instante t =

O, um vento constante aplica uma força à merendeira no sentido

negativo do eixo x

(a)

. A Fig. 7-49 mostra a posição x da merendeira

(b)

em função do tempo t. A partir do gráico, estime a energia ciné

Figua 7-47 Problema 72.

tica da merendeira (a) em t = 1,0 s e (b) em t = 5,0 s. (c) Qual é o trabalho realizado pelo vento sobre a merendeira entre t = 1,0 s

e t = 5,0 s?

73 Uma força F no sentido positivo de um eixo x age sobre um objeto que se move ao longo desse eixo. Se o módulo da força é

3

F = lOe-x12

'

,0 N, com x em metros, determine o trabalho realizado

'

-

por F quando o objeto se desloca de x = O a x = 2,0 m (a) ploando

F(x) e estimando a área sob a curva e (b) interando F(x).

2

,

' -

1

"

74 Uma partícula que se move em linha reta sofre um des-

,

•

-

A

A

locamento retilíneo d = (8 m)i + cj sob a ação de uma força

75 Um elevador tem uma massa de 4500 kg e pode ransporar uma Figura 7-49 Problema 79.

carga máxima de 1800 kg. Se o elevador está subindo com a carga

máxima a 3,80 m/s, que potência a força que move o elevador deve 80 Integração numérica. Uma caixa é deslocada ao longo de um desenvolver para manter essa velocidade?

eixo x de x = 0,15 m a x = 1,20 m por uma força cujo módulo é

-

,

76 Um bloco de gelo de 45 kg desliza para baixo em um plano dado por F = e- 2" , com x em metros e F em netons. Qual é o tra-inclinado sem arito de 1,5 m de comprimento e 0,91 m de altura. balho realizado pela força sobre a caixa?

CAPÍTULO
8

E N E RG I A POTE N C IA L

E CO N S E RVA AO DA

E N E RG IA

O Q U E É FÍS I CA?

- Uma das tarefas da física é identificar os diferentes tipos de energia que

existem no mundo, especialmente os que têm utilidade prática. Um tipo comum de

energia é a energia potencial U. Tecnicamente, energia potencial é qualquer energia que pode ser associada à coiguração (arranjo) de um sistema de objetos que exercem forças uns sobre os ouros.

Esta é uma definição muito formal para algo que na verdade é exremamente

simples. Um exemplo pode ser mais esclarecedor que a deinição. Um praticante de

bungee jmp salta de uma plataforma Fig. 8-1). O sistema de objetos é formado

pela Terra e o atleta. A força entre os objetos é a força ravitacional. A configuração

do sistema varia (a distância enre o atleta e a Terra diminui, e isso, é claro, é que

toma o salto emocionante). Podemos descrever o movimento do atleta e o aumento

de sua energia cinéica deinindo uma energia potencial gravitacional U. Trata-se de uma energia associada ao esado de separação enre dois objetos que se atraem

mutuamente aravés da força graviacional, no caso o atleta e a Terra

-

Figura 8-1 A energia cinéica de um

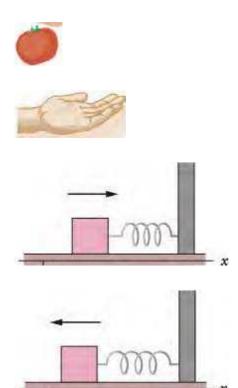
praticante de bungee jup aumenta

durane a queda livre; em seguida, a corda

começa a esticar, desacelerando o atleta.

(KOFUJIWA!amana image/Getty Images

News and Spon Sevices)

12

PARTE 1

ENERGIA POTENCIAL E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

173

Quando a corda elásica começa a esicar no final do salto, o sistema de objetos

passa a ser formado pela corda e o atleta (a variação de energia potencial gravitacional passa a ser desprezível). A força enre os objetos é uma força elástica (como a Trabalho

Trabalho

de uma mola). A configuração do sistema varia (a corda esica). Podemos relacionar

negativo

positivo

realizado

realizado

a diminuição da energia cinéica do saltador ao aumento do comprimento da corda

pela força

pela força

deinindo uma eneia potenial elástica U. Trata-se da energia associada ao estado gravitacional

gravitacional

de compressão ou distensão de um objeto elástico, a corda, no caso.

A física ensina como calcular a energia potencial de um sistema, o que ajuda a

escolher a melhor forma de usá-la ou armazená-la. Antes que um praticante de bungee jup inicie um salto, por exemplo, alguém (provavelmente um engenheiro mecânico) precisa verificar se a corda que será usada é segura, determinando a eneria potencial ravitacional e a enegia potencial elástica que podem ser esperadas. Caso

os cálculos sejam bem feitos, o salto pode ser emocionante, mas não fatal.

8-2 Trabalho e Energia Potencial

Figua 8-2 Um tomate é arremessado

para cima. Enquanto sobe, a força

No Capítulo 7, discutimos a relação enre o rabalho e a variação da energia cinéica. gravitacional realiza um rabalho Agora, vamos discuir a relação enre trabalho e a variação da energia potencial.

negativo sobre o tomate, diminuindo

Suponha que um tomate seja arremessado para cima (Fig. 8-2). Já sabemos que, sua energia cinética. Quando desce, a enquanto o tomate está subindo, o trabalho W

força gravitacional realiza um rabalho

8 realizado pela força gravitacional sobre o tomate é negativo porque a força extrai energia da energia cinética do tomate. posiivo, aumentando a energia cinética Podemos agora concluir a história dizendo que essa enegia é transferida pela força do tomate.

raviacional da energia cinética do tomate para a energia potencial gravitacional

do sistema tomate-Terra.

O tomate perde velocidade, para e começa a cair de volta por causa da força

gravitacional. Durante a queda, a ransferência se inverte: o rabalho W8 realizado sobre o tomate pela força gravitacional agora é posiivo e a força gravitacional passa

a transferir energia da energia potencial gravitacional do sistema tomate-Terra para a energia cinética do tomate.

Tanto na subida como na descida, a variação .U da energia potencial gravitacional é definida como o negativo do trabalho realizado sobre o tomate pela força ravitacional. Usando o símbolo geral W para o rabalho, podemos expressar essa

definição aravés da seguinte equação:

iU = -W.

(8-1)

Esa equação também se aplica a um sistema massa-mola como o da Fig. 8-3. Se

empurramos bruscamente o bloco, movimentando-o para a direita, a força da mola

atua para a esqurda e, portanto, realiza trabalho negativo sobre o bloco, transferindo

o

energia da energia cinética do bloco para a energia potencial elástica do sistema blo

(a)

co-mola. O bloco perde velocidade até parar; em seguida, começa a se mover para

a esquerda, já que a força da mola ainda está dirigida para a esquerda. A parir desse

momento, a transferência de energia se inverte: a energia passa a ser ransferida da

energia potencial do sistema bloco-mola para a energia cinéica do bloco.

Foças Consevativas e Dissipativas

o

(b)

V amos fazer uma lista dos elementos principais das duas situações que acabamos Figua 8-3 Um bloco, preso a uma de discutir:

mola e inicialmente em repouso em

1. O sistema é formado por dois ou mais objetos.

x = O, é colocado em movimento para

2. Uma força atua enre um objeto do sistema que se comporta como parícula (o a direita. (a) Quando o bloco se move tomate ou o bloco) e o resto do sistema.

para a direita (no sentido indicado pela

3. Quando a coniguração do sistema varia, a força realiza trabalho (W

sea), a força elásica da mola realiza

1, digamos) rabalho negativo sobre o bloco. (b)

sobre o objeto, ransferindo energia cinética K do objeto para alguma oura forma Mais tarde, quando o bloco se move de energia do sistema

para a esquerda, em dir

4. Quando a mudança da coniguração se inverte, a força inverte o senido da rans

ção ao ponto

x = O, a força da mola realiza trabalho

ferência de energia, realizando um rabalho W2 no processo.

posiivo sobre o bloco.

Nas situações em que a relação W1 = - W2 é sempre observada, a oura forma

de energia é uma enegia potencial e dizemos que a força é uma força conservaiva. Como o leitor já deve ter desconiado, a força gravitacional e a força elásica são conservativas (de oura forma, não poderíamos ter falado em energia potencial

gravitacional e em enegia potencial elásica, como fizemos anteriormente).

Uma força não conservativa é chamada de força dissipaiva. A força de arito

cinético e a força de arasto são forças dissipaivas. Imagine, por exemplo, um bloco

deslizando em um piso que não seja sem arito. Durante o deslizamento, a força de

arito cinético exercida pelo piso reliza um rabalho negaivo sobre o bloco, reduzindo sua velocidade e transferindo a energia cinética do bloco para oura forma de energia chamada de energia térmica (que está associada ao movimento aleatório de

átomos e moléculas). Os experimentos mosram que esta transferência de energia

não pode ser rvertida (a energia térmica não pode ser convertida de vola em energia

cinética do bloco pela força de atrito cinético). Assim, embora tenhamos um sistema

(composto pelo bloco e pelo piso), uma força que atua enre partes do sistema e uma

ransferência de energia causada pela força, a força não é conservativa. Isso signiica

que a energia térmica não é uma energia potencial.

Quando um objeto que se comporta como uma partícula está sujeito apenas

a forças conservativas, certos poblemas que envolvem o movimento do objeto se

tomam muito mais simples. Na próxima seção, em que apresentamos um método

para ideniicar forças conservaivas, será apresentado um exemplo deste tipo de

simpliicação.

8-3 Independência da Trajetória para o Trabalho de

Forças Consevativas

O teste principal para determinar se uma força é conservaiva ou dissipativa é o seguinte: deixa-se a força atuar sobre uma parícula que se move ao longo de um percurso fechado, começando em uma certa posição e retomando à mesma posição (ou seja, fazendo uma viagem de ida e volta). A força é conservativa se e apenas se a

energia toal ransferida durante a viagem de ida e vola, ao longo deste ou de qualquer ouro percurso fechado, for nula. Em outras palavras: O rabalho total realizado por uma força conservativa sobre uma partícula que se move

ao longo de qualquer percurso fechado é nulo.

Sabemos, através de experimentos, que a força gravitacional passa neste teste

do percurso fechado. Um exemplo é o tomate da Fig. 8-2. O tomate deixa o ponto

de lançamento com velocidade v0 e energia cinética . mv5. A força graviacional que 2

age sobre o tomate reduz sua velocidade a zero e depois o faz cair de volta. Quando

o tomate retoma ao ponto de partida, possui novamente uma velocidade v0 e uma

energia cinética !. mv$. Assim, a força gravitacional exrai tanta energia do tomate 2

durante a subida quanto fonece enegia ao tomate durante a descida. O rabalho to—

tl realizado sobre o tomate pela força ravitacional durante a viagem de ida e volta

é, portanto, nulo.

Uma consequência importante do teste do percurso fechado é a seguinte:

O rabalho realizado por uma força conservativa sobre uma partícula que se move

entre dois pontos não depende da rajetória seguida pela partícula.

Suponha, por exemplo, que a parícula se move do ponto a para o ponto b da Fig.

8-4a seguindo a trajetória 1 ou da rajetória 2. Se todas as forças que agem sobre a

(a)

partícula descreve um percurso fechado,

seguindo a trajetória 1 para ir do ponto

1

a ao ponto b e a trajetória 2 para voltar

E o trabalho realizado pela

ao ponto a.

a

2

força em um percurso

fechado é zero.

(b)

partícula são conservaivas, o trabalho realizado sobre a parícula é o mesmo para as

duas trajetórias. Em símbolos, podemos escrever este resultado como

(8-2)

onde o índice ab indica os pontos inicial e final, respectivamente, e os índices 1 e 2

indicam a trajetória

Este resultado é importante porque permite simpliicar problemas diíceis quando

apenas uma foça conservativa está evolvida. Suponha que você precise calcular o

trabalho realizado por uma força conservaiva ao longo de uma cera rajetória enre

dois pontos e que o cálculo seja difícil ou mesmo impossível sem informações adicionais. Você pode determinar o rabalho substituindo a rajetória enre esses dois pontos por oura para a qual o cálculo seja mais fácil.

Demonstaão da Equaão 8-2

A Fig. 8-4b mosra um percurso fechado arbirário de uma parícula sujeita à ação

de uma única força. A parícula se desloca de um ponto inicial a para um ponto b

seguindo a rajetória 1 e volta ao ponto a seguindo a trajetória 2. A força realiza rabalho sobre a parícula enquanto ela se desloca em cada uma das trajetórias. Sem nos preocuparmos em saber se o trabalho realizado é posiivo ou negativo, vamos represenar o trabalho realizado de a até b ao longo da trajetória 1 como Wab,I e o rabalho realizado de b até a ao longo da rajetória 2 como Wba 2•

' Se a força é conservativa, o

trabalho total realizado durante a viagem de ida e volta é zero:

Wah.1 + w,02 = O,

e, portanto,

(8-3)

Em palavras, o rabalho realizado ao longo da rajetória de ida é o negaivo do trabalho realizado ao longo da rajetória de volta.

Consideremos agora o rabalho ,b,2 realizado pela foça sobre a parícula quando

ela se move de a para b ao longo da trajetória 2 Fig. 8-4a). Se a foça é conservaiva, este rabalho é o negativo de W a, 2:

wab.2 = - wha.2·

(8-4)

Substituindo -Wba,z por Wab, 2 na Eq. 8-3, obtemos

como queríamos demonsrar.

[illegible] 1*

A ira mosra rês rajetórias ligando os pontos a e

- 60 J

b. Uma única força F realiza o rabalho indicado sobre

a

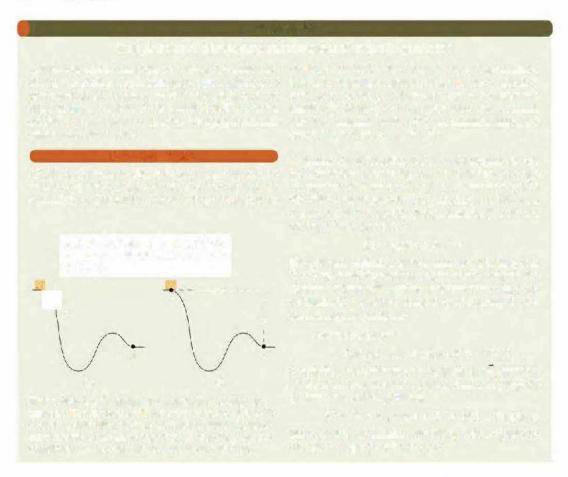
uma parícula que se move ao longo de cada rajetória

60J

no sentido indicado. Com base nessas informações,

b

podemos airmar que a força F é conservativa?

60J

Exemplo

Trajetórias equivalentes para calcular o trabalho: queijo gorduroso

A Fig. 8-5a mosra um pedaço de 2,0 kg de queijo gor de forma desconhecida. (Mesmo que conhecêssemos a duroso que desliza por um trilho sem arito do ponto a ao forma da trajetória e pudéssemos determinar o valor de p ponto b. O queijo percorre uma distância total de 2,0 m ao para todos os pontos, o cálculo provavelmente seria muito longo do rilho e uma distância vertical de 0,80 m. Qual é difícil.) (2) Como [illegible] é uma força conservaiva, podemos o rabalho realizado sobre o queijo pela força graviacional calcular o trabalho escolhendo oura trajetória entre a e b

durante o deslocamento?

que tone os cálculos mais simples.

I D EIAS-CHAVE

lculs Vamos escolher o percurso racejado da Fig.

(1) Não podemos usar a Eq. 7-12 (W

8-5b, que é formado por dois segmentos de reta. Ao longo

g = mgd cos p) para

calcular o trabalho, já que o ângulo > entre a força gravi do segmento horizontal, o ângulo > é constante e igual a tacional Fc e o deslocamento a varia de ponto para ponto 90°. Não conhecemos o deslocamento horizontal de a para b, mas, de acordo com a Eq. 7-12, o trabalho Wh realizado

ao longo desse segmento é

A força gravitacional é conservativa;

W

o trabalho realizado não

r = n1gd co> 90º = O.

depende da

trajetória.

No segmento vertical, o deslocamento d é 0,80 m e, com

- -

[illegible] d apontando verticalmente para baixo, o ângulo p é***

--- - - - - ,

constante e igual a 0°. Assim, de acordo com a Eq. 7-12,

a

1 o rabalho W, realizado ao longo do recho veical do percurso racejado é dado por

Wv = nigd cos Oº

b

b

= (2,0 kg)(9.8 m/s2)(0.80 m.)(1) = 15,7 l

O rabalho total realizado sobre o queijo por [illegible] o

()

(b)

queijo se desloca do ponto a para o ponto b ao longo do

Figua 8-5 (a) Um pedaço de queijo desliza ao longo de

percurso racejado é, portanto,

uma superfície curva sem arito do ponto a para o ponto b. (b)

W = W

O rabalho realizado pela força gravitacional sobre o queijo é

11 + Wv = O + 15,7 J = 16 J.

(Resposta)

mais fácil de calcular para a rajetória racejada do que para a

Este é também o trabalho realizado quando o queijo esrajetória real, mas o resultado é o mesmo nos dois casos.

correga ao longo do rilho de a a b.

8-4 Cálculo da Energia Potencial

Os valores dos dois tipos de energia potencial discutidos neste capítulo, a energia

potencial gravitacional e a energia potencial elástica, podem ser calculados com o

auxlio de equações. Para chegar a essas equações, porém, precisamos obter primeiro uma relação geral entre uma força conservativa e a energia potencial a ela associada.

Considere um objeto que se comporta como uma partícula e que faz parte de

um sistema no qual atua uma força conservaiva F. Quando essa força realiza um

rabalho W sobre o objeto, a variação ÂU da energia potencial associada ao sistema é o negativo do trabalho realizado. Este fato é expresso pela Eq. 8-1 (.U = -W).

No caso mais geral em gue a força varia com a posição, podemos escrever o rabalho W como na Eq. 7-32: W = f; (X) d;(.

(8-5)

Xx,

Esta equação permite calcular o rabalho realizado pela força quando o objeto se

desloca do ponto X; para o ponto x' mudando a configuração do sistema. (Como a força é conservativa, o rabalho é o mesmo para qualguer percurso enre os dois

pontos.)

Subsituindo a Eq. 8-5 na Eq. 8-1, descobrimos que a variação de energia potencial associada à mudança de coniguração é dada pela seguinte equação: Í.r,

$.U = - F(x) dx.$

(8-6)

$x,$

Enegia Potencial Gavitacional

Consideramos inicialmente uma partícula de massa m que se move veicalmente ao longo

de um eixo y (com o senido posiivo para cima). Quando a parícula se move do ponto

J; para o ponto Yft a orça ravitacional g realiza abho sobre ela. Para detrminar a variação corresondente da eneria potencial ravitacional do sistema partícula-Terra,

usamos a Eq. 8-6 com duas modicações: (1) Integramos ao longo do eixo y em vez do

eixo x, já que a força ravitacional age na direção verical. (2) Subsituímos a força F por

-mg, pois g possui módulo mg e esá orienada no senido negaivo do y. Temos: [illegible]

1U = [illegible] (-mg) dy = mg dy = mg[yJ:,

e, poranto,

.U = nig(y1 - y;) = rng .y.

(8-7)

São apenas as variações lU da energia potencial gravitacional (ou de qualquer

outro ipo de enegia) que possuem signiicado físico. Enretanto, para simpliicar um

cálculo ou uma discussão, às vezes gostaríamos de dizer que um certo valor de enegia

potencial gravitacional U está associado a um certo sistema parícula-Tera quando

a partícula está a uma certa altura y. Para isso, escrevemos a Eq. 8-7 na forma U - U; = 1ng(y - y1).

(8-8)

e tomamos Ui como a energia potencial graviacional do sistema quando o sistema

se enconra em uma con"iguração de referência na qual a partícula está em um

ponto de referência yi. Normalmente, tomamos Ui = O e Y; = O. Fazendo isso, a Eq. 8-8 se toma

U(y) = mgy

(energia potencial gravitacional).

(8-9)

Essa equação nos diz o seguinte:

A energia potencial gravitacional associada a um sistema partícula-Terra depende

apenas da posição vertical y (ou altura) da parícula em relação à posição de referência y = o.

Enegia Potencial Elásica

Consideramos a seguir o sistema massa-mola da Fig. 8-3, com o bloco se movendo

na extremidade de uma mola de constante elásica k. Enquanto o bloco se desloca do ponto X; para o ponto xt a força elástica Fx = -x realiza trabalho sobre o bloco.

Para determinar a variação correspondente da energia potencial elásica do sistema

bloco-mola, substituímos F(x) por -x na Eq. 8-6, obtendo

1U = - f r, (-kx) dx = l

k xr x dx = [

!k x Jr'

2 ,

r,

X1

X;

ou

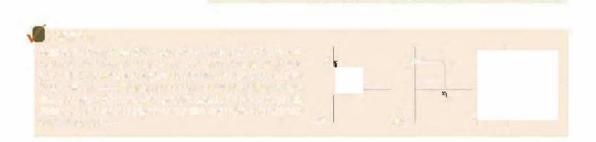
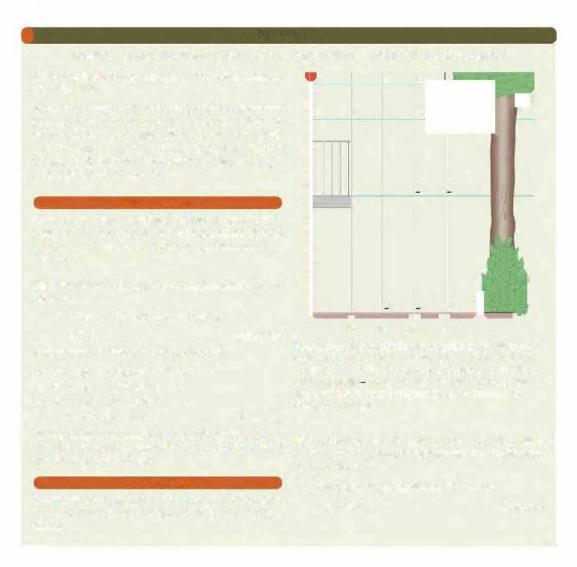
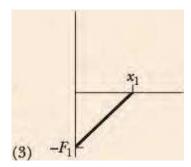
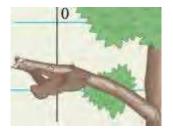
.U = }kx7 - f kxr,

(8-10)

Para associar um valor de energia potencial U ao bloco na posição x, escolhemos a configuração de referência como aquela na qual a mola se enconra no estado relaxado e o bloco está em X; = O. Nesse caso, a energia potencial elásica U; é zero e a Eq. 8-10 se toma

U - O = !kx 2 - O,

x_1

x_1
(3)
$-F_1$

o que nos dá

U(x) = !kx2 [illegible] potencial elástica).

(8-11)

TESTE 2

Uma partícula se move ao longo de um eixo x de x = O para x =

x1 enquanto uma força conservativa, orientada ao longo do eixo x,

Fi

*j [illegible]

atua sobre a partícula. A igura mostra rês situações nas quais a

força varia com x. A força possui o mesmo módulo máximo F1 nas

rês situações. Ordene as situações de acordo com a variação da

energia potencial associada ao movimento da partícula, começando

pela mais positiva.

(l)

(2)

Exemplo

Escolha do nvel de referência paa a energia potencial gravitacional de uma preguiça

Uma preguiça de 2,0 kg está pendurada a 5,0 m acima do

6

3

1

solo (Fig. 8-6).

(a) Qual é a energia potencial gravitacional U do sistema

preguiça-Terra se tomarmos o ponto de referência y

5

2

o

= O

como estando (1) no do solo, (2) no piso de uma varanda

que está a 3,0 m acima do solo, (3) no galho onde está a

preguiça e (4) 1,0 m acima do galho? Considere a energia

potencial como nula em y = O.

3

o

- 2

- 3

IDEIA-CHAVE

Uma vez escolhido o ponto de referência para y = O,

podemos calcular a energia potencial gravitacional U do

sistema em relação a esse ponto de referência usando a

Eq. 8-9.

álculos No caso da opção (1), a preguiça está em y =

5,0 m e

o

V =

- 3

- 5

[illegible]

mgy = (2,0 kg)(9,8 m/s2)(5,0 m)

1

1 r ,

= 98 J.

(Resposta)

(l)

(2)

(3)

(4)

Para as ouras escolhas, os valores de U são

Figura 8-6 Quatro escolhas para o ponto de referência y =

O. Em cada eixo y estão assinalados alguns valores da altura

(2) U = mgy = mg(2,0 m) = 39 J,

em meros. A escolha afea o valor da energia potencial U do

(3) U = mgy = nig(O) = O J,

sistema preguiç a -Terra, mas não a variação ,.U da energia

potencial do sistema se a preguiça se mover, descendo da

(4) V = mgy = mg(-1,0 m)

árvore, por exemplo.

= -19,6 J = -20J.

(Resposta)

(b) A preguiça desce da árvore. Para cada escolha do ponto

de referência, qual é a variação .U da energia potencial Cálulo Nas quaro situações, temos o mesmo valor, do sistema preguiça-Terra?

.y = -5,0 m. Assim, para as situações (1) a (4), de acordo com a Eq. 8-7,

IDEIA-CHAVE

ÀV = ,ng Ãy = (2,0 kg)(9,8 m/s2)(-5.0 m)

A variação da energia potencial não depende da escolha

do ponto de referência, mas apenas de .y, a variação de

= -98 J.

(Resposta)

altura.

$K_2 + U_2 = K_1 + U_1$

8-5 Consevação da Energia Mecânica

•

A eneria mecânica Emc de um sistema é a soma da energia potencial U do sistema com a energia cinéica K dos objetos que compõem o sistema:

Emc = K + U (energia mecânica).

(8-12)

Nesta seção, vamos discutir o que acontece com esta energia mecânica quando as

transferências de energia denro do sistema são produzidas apenas por forças conservativas, ou seja, quando os objetos do sistema não estão sujeitos a forças de arito e de arrasto. Além disso, vamos supor que o sistema esá isolado do ambiente, isto é,

que nenhuma força extena produzida por um objeto fora do sistema causa variações

de energia denro do sistema.

Quando uma força conservativa realiza um rabalho W sobre um objeto dentro

do sistema, essa força é responsável por uma transferência de energia enre a energia

cinéica K do objeto e a energia potencial U do sistema De acordo com a Equação 7-1 O, a variação K da energia cinética é

.K = W

(8-13)

e, de acordo com a Eq. 8-1, a variação 6. U da energia potencial é

No passado, costumava-se arremessar

as pessoas para o alto, usando um

1U = -W.

(8-14) cobertor, para que pudessem enxergar

Combinando as Eqs. 8-13 e 8-14, temos:

mais longe. Hoje em dia, isso é feito

apenas por diversão. Durante a subida

.K = -AU.

(8-15) da pessoa que aparece na fotorafia, a

energia é ransferida da energia cinética

Em palavras, uma dessas energias aumenta exatamente da mesma quantidade que para energia potencial gravitacional.

a outra diminui.

A alura máxima é atingida quando a

Podemos escrever a Eq. 8-15 na forma

ransferência se complea. Durante a

K

queda, a transferência ocorre no sentido

2 - K1 = -(U2 - U1).

(8-16) inverso. (©AP/Wide World Photos)

onde os índices se referem a dois instantes diferentes e, portanto, a duas configura

ções disintas dos objetos do sistema. Reagrupando os termos da Eq. 8-16, obtemos

a seguinte equação:

(conservação da energia mecânica).

(8-17)

Em palavras, esta equação diz o seguinte:

(soma de K e U para qualquer) = (soma de K e U para qualquer) estado do sistema

outro estado do sistema '

quando o sistema é isolado e apenas forças conservativas atuam sobre os objetos do

sistema. Em outras palavras:

Em um sistema isolado no qual apenas forças conservativas causam variações de

energia, a energia cinéica e a energia potencial podem variar, mas a soma das duas

energias, a energia mecânica Emec do sistema, não pode variar.

Este resultado é conhecido como princípio de conservação da energia mecânica.

(Agora você pode entender a origem do nome força conservativa.) Com o auxlio

da Eq. 8-15, podemos escrever este princípio de oura forma:

AL'mec = .K + . u = O.

(8-18)

O princípio de conservação da energia mecânica permite resolver problemas que

seriam muito difíceis de solucionar usando apenas as leis de Newton:

Quando a energia mecânica de um sistema é conservada, podemos iualar a soma da

energia cinéica com a energia potencial em um instante à soma em ouro instante sem

levar em conta o movimento intemediário e sem calcular o trabalho realizado pelas

forçs envolvids.

$K_2 = 20\ \text{J}.$

A Fig. 8-7 mosra um exemplo no qual o princípio de conservação da energia

mecânica pode ser aplicado. Quando um pêndulo oscila, a energia do sistema pêndulo-Terra é transferida da energia cinéica K para a energia potencial gravitacional U e vice-versa, com a soma K + U permanecendo constante. Se conhecemos a energia potencial gravitacional quando o peso do pêndulo está no ponto mais alto

(Fig. 8-7c), a Eq. 8-17 nos fonece a energia cinética do peso no ponto mais baixo

(Fig. 8-7e).

Vamos, por exemplo, escolher o ponto mais baixo como ponto de referência,

com a energia potencial gravitacional U2 = O. Suponha que a energia potencial no ponto mais alto seja U 1 = 20 J em relação ao ponto de referência. Como o peso se

imobiliza momentaneamente ao atingir o ponto mais alto, a energia cinéica nesse

ponto é K 1 = O. Substituindo estes valores na Eq. 8-17, obtemos a energia cinéica

K2 no ponto mais baixo:

K + O

2

= O + 20 T

)ti

Observe que obivemos este resultado sem considerar o movimento enre os pontos

mais baixo e mais alto (como na Fig. 8-7) e sem determinar o rabalho realizado

pelas forças responsáveis pelo movimento.

v = +vmáx

Somente energia cinética

- , •

V

- V

V

Figua 8-7 Um pêndulo, com a

massa concenrada em um peso na

I U K

U K

U K

extremidade inferior, oscila de um

(a)

\

,

.

(h)

(b)

lado para o outro. E mostrado um ciclo

completo do movimento. Durane o

ciclo, os valores da energia potencial

e cinética do sistema pêndulo-Terra

-

variam quando o peso sobe e desce,

V = Ü

mas a energia mecânica Emec do sistema

A energia total

permanece consante. Pode-se dizer que

Somente energia

potencial; o peso tem velocidade nula

v = - vmx

e se enconra no ponto mais alto da

rajetória. Nas posições (b), (),) e

,»-

U K

V

l/

(h), metade da energia é energia cinética

e a oura metade é energia potencial.

U K

Se a oscilação do pêndulo envolvesse

(!)

(d)

uma foça de arito no ponto onde o

pêndulo está preso ao teto ou uma

Somente energia cinética

força de arrasto devido ao ar, E 1' não

seria conservada e o pêndulo acabaria

U K

parando.

(e)

$$K_b + U_b = K_a + U_a,$$

ou $$\tfrac{1}{2}mv_b^2 + mgy_b = \tfrac{1}{2}mv_a^2 + mgy_a.$$

PARTE 1

ENERGIA POTENCIAL E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

181

" TESTE 3

A igura mostra quaro situações: uma na qual um bloco inicialmente A Q-

em repouso é deixado cair e três outras nas quais o bloco desce desli

1 1

zando em rampas sem arito. (a) Ordene as situações de acordo com

1 1

a energia cinéica do bloco no ponto B, em ordem decrescente. b)

1 1

Ordene as situações de acordo com a velocidade do bloco no ponto

1 1

B, em ordem decrescente.

B ,

B

(1)

(2)

(3)

(4)

Exemplo

Consevação de energia mecânica em um toboágua

Na Fig. 8-8, uma criança de massa m parte do repouso no criança-Terra como o nosso sistema, que podemos conalto de um toboágua, a uma altura h = 8,5 m acima da siderar isolado.

base do brinquedo. Supondo que a presença da água toma

Assim, temos apenas uma força conservativa realio atrito desprezível, determine a velocidade da criança ao zando rabalho em um sistema

isolado e, portanto, pochegar à base do brinquedo.

demos usar o princípio de conservação da energia meA

•

camca.

IDEIAS-CHAVE

(1) Não podemos calcular a velocidade da criança usando a Cálculos Seja Emc,a a energia mecânica quando a criança aceleração durante o percurso, como fizemos em capítulos está no alto do toboágua e Emecb a energia mecânica quando anteriores, porque não conhecemos a inclinação (ângulo) a criança esá na base. Nesse caso, de acordo com o prindo toboágua. Entretanto, como a velocidade está relacio cípio da conservação da enrgia mecânica, nada à energia cinética, talvez possamos usar o princípio

E

- E

da conservação da enrgia mecânica para calcular a velo

mec,b - , mec,a ·

(8-19)

cidade da criança Nesse caso, não precisaríamos conhe Explicitando os dois tipos de energia mecânica, escrevecer a inclinação do brinquedo. (2) A energia mecânica é mos conservada em um sistema se o sistema é isolado e se as

(8-20)

transferências de energia denro do sistema são causadas

apenas por forças conservativas. Vamos veriicar.

Forças Duas forças auam sobe a criança. A força gravitacional, que é uma força conservativa, realiza trabalho Dividindo a equação por m e reagrupando os termos, tesobre a criança. A força normal exercida pelo toboágua mos: sobre a criança não realiza rabalho, pois a direção dessa

vt = [illegible] + 2g(y1, - Yb).

força em qualquer ponto da descida é sempre perpendicular à direção em que a criança se move.

Fazendo v0 = O e Ya-Yb = h, temos:

Sistema Como a única força que realiza trabalho so

vb = h = (2)(9,8 m/s2)(8,5 m)

bre a criança é a força gravitacional, escolhemos o sistema

= 13 m/s.

(Resposta)

Esta é a mesma velocidade que a criança teria se caísse

verticalmente de uma altura de 8,5 m. Em um brinquedo

de verdade, haveria algum arito e a criança chegaria à base

com uma velocidade um pouco menor.

A energia mecânica

total em cima é igual _

,

Comenios Embora este problema seja diícil de ser re

à energia mecânica

solvido aplicando diretamente as leis de Newton, o uso da

total embaixo. -

-

-

conservação da energia mecânica toma a solução bem simples. Enretanto, se alguém quer saber qual é o tempo que a criança leva para chegar à base do toboágua, os métodos

baseados em energia são inúteis; precisaríamos conhecer

Figua 8-8 Uma criança desce uma altura h escorregando em a forma exata do toboágua e, mesmo assim, teríamos um um toboáua.

problema muito difícil pela frente.

8-6 Interpretação de uma Cuva de Energia Potencial

Mais uma vez vamos considerar uma parícula pertencente a um sistema no qual

aua uma força conservativa. Desta vez supomos que o movimento da parícula se

dá ao longo de um eixo x enquanto uma força conservativa realiza trabalho sobre

ela. Podemos obter muitas informações a respeito do movimento da partícula a parir

do gráico da energia potencial do sistema em função da posição da partícula, U(x).

Antes de discutir este ipo de gráfico, porém, precisamos de mais uma relação.

Cálculo da Força

A Eq. 8-6 pode ser usada para calcular a variação iU da energia potencial enre

dois pontos em uma situação unidimensional a parir da força F(x). Agora estamos

interessados em fazer o contrário, ou seja, calcular a força a parir da função energia

potencial U(x).

No caso do movimento em uma dimensão, o rabalho W realizado por uma for

ça que age sobre uma partícula quando a partícula percore uma disância ix é F(x)

x. Nesse caso, a Eq. 8-1 pode ser escrita na forma

.U(x) = -W = - F(x) .x.

(8-2 1)

Explicitando F(x) e fazendo o acréscimo x tender a zero, temos:

F(x) = _ dU(x)

dx

(movinen10 em ua dimensão).

(8-22)

que é a equação procurada.

Podemos veriicar se este resultado está correto fazendo U(x) = .x2, que é 2

a unção energia potencial elástica associada a uma força elásica. Nesse caso, o

uso da Eq. 8-22 leva, como seria de se esperar, à equação F(x) = -x, que é a lei de Hooke. Da mesma forma, podemos fazer U(x) = mgx, que é a energia potencial gravitacional de um sistema parícula-Terra, com uma parícula de massa m a uma

altura x acima da superfície da Terra. Nesse caso, a Eq. 8-22 nos dá F = -mg, que é a força gravitacional a que a partícula está submetida.

A Cuva de Energia Potencial

A Fig. 8-9a é um gráico de uma função energia potencial U(x) para um sistema

no qual uma partícula se move em uma dimensão enquanto uma força conservativa F(x) realiza trabalho sobre ela. Podemos facilmente calcular F(x) determinando (graicamente) a inclinação da curva de U(x) em vários pontos. [De acordo com a

Eq. 8-22, F(x) é o negativo da inclinação da curva U(x).) A Fig. 8-9b é um gráico

de F(x) obido desta forma.

Pontos de Retorno

A energia mecânica E de um sistema com o da Fig. 8-9 tem um valor constante

dado por

U(x) + K(x) = Emcc·

(8-23)

onde a energia potencial U(x) e a energia cinéica K(x) são funções da posição x da partícula. Podemos reescrever a Eq. 8-23 na forma

K(x) = Emec - U(x).

(8-24)

Suponha que Emec (que, como sabemos, tem um valor consante) seja, por exemplo,

igual a 5,0 J. Este valor pode ser representado na Fig. 8-9a por uma reta horizontal

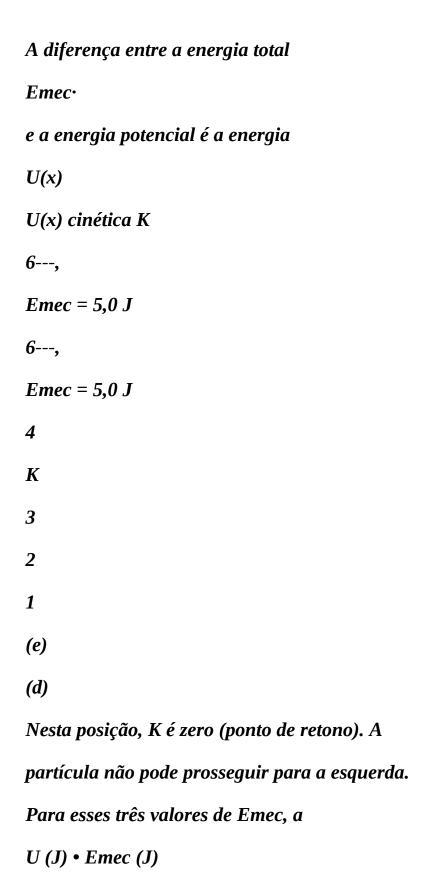
que intercepta o eixo da energia no ponto correspondente a 5,0 J. (A reta é mosrada na figura.)

x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x

5

5
4
3
2
1

x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x

x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x

1

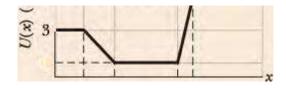
(e)

f)

Xi

X1

Figua 8-9 (a) Gráico de U(x), a função energia potencial de um sistema com uma partícula que se move ao longo de um eixo x. Como não existe arito, a energia mecânica é conservada. (b) Gráfico da força F(x) que age sobre a partícula, obtido a parir do gráfico da energia potencial determinando a inclinação do gráfico em vários pontos. (c)-(e) Como

determinar a energia cinética.) O mesmo gráfico de (a), com três possíveis valores de Enc·

Podemos usar a Eq. 8-24 e a Fig. 8-9d para determinar a energia cinética K correspondente a qualquer localização x da partícula a partir do gráico de U(x). Para isso, determinamos, na curva de U(x), o valor de U para essa localização x e, em seguida, subtraímos U de E1•0• Na Fig. 8-9e, por exemplo, se a partícula se enconra em qualquer ponto à direita de x5, K = 1,0 J. O valor de K é máximo (5,0 J) quando a partícula está em z e mínimo (O J) quando a parícula está em x1•

Como K não pode ser negativa pois v2 é necessariamente um número positivo), a parícula não pode passar para a região à esquerda de x1, na qual Emec - U é um número negaivo. Quando a partícula se move a parir de x2 em direção a x1, K

diminui (a velocidade da partícula diminui) até que K = O em x = x1 (a velocidade da parícula se anula).

Observe que quando a parícula chega a x1, a força que age sobre a partícula,

dada pela Eq. 8-22, é positiva (pois a derivada dU/x é negaiva). Isso signiica que a partícula não ica parada em x1, mas começa a se mover para a direita, invertendo

seu movimento. Assim, x1 é um ponto de retomo, um lugar onde K = O (já que

U =) e a partícula inverte o senido de movimento. Não existe ponto de retomo (em que K = O) no lado direito do ráfico. Quando a partícula se desloca para a direita, ela continua a se mover indeinidamente neste sentido.

Pontos de Equilbrio

A Fig. 8-9/mostra três valores diferentes de Emec superpostos ao gráfico da função

energia potencial U(x) da Fig. 8-9a. Vejamos como esses valores alteram a situa

ção. Se Emec = 4,0 J (reta violeta), o ponto de retorno muda de x1 para um ponto

entre x1 e z. Além disso, em qualquer ponto à direita de x5, a energia mecânica do

sistema é igual à energia potencial; assim, a partícula não possui energia cinética

e (de acordo com a Eq. 8-22) nenhuma força atua sobre a mesma, de modo que

permanece em repouso. Diz-se que uma parícula nesta situação está em equilíbrio neutro. (Uma bola de gude sobre uma mesa horizontal é um exemplo deste tipo de equilíbrio.)

Se Emec = 3,0 J (reta cor-de-rosa), existem dois pontos de retono, um entre x1 e

x2 e o ouro enre x4 e x5• Além [illegible] é um terceiro ponto no qual K = O. Se a par

ícula estiver exatamente neste ponto, a força sobre ela também será nula e a parícula

permanecerá em repouso. Enretanto, se a partícula for ligeiramente deslocada em

qualquer senido, uma força a empurrará no mesmo sentido e a partícula continuará

a se mover, afastando-se cada vez mais do ponto inicial. Diz-se que uma partícula

nesta situação está em equihôrio instável. (Uma bola de gude equilibrada no alto

de uma bola de boliche é um exemplo deste ipo de equilibrio.)

Considere agora o comportamento da partícula se Emec = 1,0 J (reta verde). Se

a parícula é colocada em x4, ica indeinidamente nessa posição. Ela não pode se

mover nem para a direita nem para a esquerda, pois para isso seria necessária uma

enegia cinéica negativa. Se a empurramos ligeiramente para a esquerda ou para a

direita, surge uma força resauradora que a faz retornar ao ponto x4• Diz-se que uma

parícula nesta situação está em equihôrio estável. (Uma bola de gude no fundo

de uma igela hemisférica é um exemplo deste tipo de equilíbrio.) Se colocarmos a

parícula no poço de potencial em forma de taça com cenro em 2, ela estará enre dois pontos de retomo. Poderá se mover, mas apenas entre x1 e x3•

-TESTE 4

A iura mosra a unção energia potencial U(x) de

um sisema no qual uma partícula se move em uma

_________ l

- 5

dimensão. (a) Ordene as regiões AB, BC e CD de

acordo com o módulo da força que age sobre a partícula, em ordem decrescente . (b) Qual é o senido 1

da força quando a partícula está na região AB?

A B

C D

força conservaiva. A Fig. 8-lOa mostra a energia poten16

cial U(x) associada à força. De acordo com o gráico, se a

l A energia cinética é a

parícula for colocada em qualquer posição entre x

i

diferença entre a

= O e

7 -

x

energia total e a

= 7 ,00 m, terá o valor indicado de U. Em x = 6,5 m, a

energia potencial.

5

í'

velocidade da partícula é v 0 = (-4,00 m/s)i.

o l

4

6 7

(a) Use os dados da Fig. 8-lOa para determinar a veloci

E

16 - 7,0

mec = Ko + Uo = 16,0 J + O = 16,0 J.

d

4,0 - 1,0 '

Este valor de Emec está plotado como uma reta horizonal

na Fig. 8-1 Oa. Como se pode ver na igura, em x = 4,5 m o que nos dá d = 2,08 m. Assim, o ponto de retomo está a energia potencial é U

localizado em

1 = 7,0 J. A energia cinética K1 é a

difrença enre Emec e U1:

x = 4,0 m - d = 1.9 m.

(Resposta)

K, = Emec - Ui = 16,0J - 7,0 J = 9,0J.

(c) Determine a força que age sobre a parícula quando ela

1

Como K

se encontra na região 1,9 m < x < 4,0 m.

1 = - mvf, temos:

2

v1 = 3,0 m/s.

(Resposta)

IDEIA-CHAVE

(b) Qual é a localização do ponto de retomo da parícula? A força é dada pela Eq. 8-22 [F(x) = -dU(x)ldx]. De acordo com a equação, a força é o negaivo da inclinação

IDEIA-CHAVE

da curva de U(x).

O ponto de retomo é o ponto em que a força anula momentaneamente e depois inverte o movimento da partícula. Cálcuos Examinando o gráico da Fig. 8-lOb, vemos que Nesse ponto, v = O e, portanto, K = O.

na região 1,0 m < x < 4,0 m a força é

álculos Como K é a diferença enre Enec e U, estamos

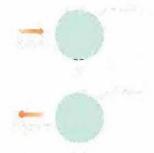
F = _ 20 J - 7.0 J = [illegible] N.

interessados em determinar o ponto da Fig. 8-1 Oa em que

1,0 1n - 4,0 m

(Resposta)

o gráfico de U encontra a reta horizontal de Emec• como Assim, a força tem módulo 4,3 N e está orientada no senmosra a Fig. 8-1 Ob. Como o gráfico de Ué uma linha reta ido positivo do eixo x. Este resultado é coerente com o na Fig. 8-lOb, podemos traçar dois riângulos retângulos fato de que a parícula, que inicialmente está se movendo semelhantes e usar o fato de que a razão entre os catetos é para a esquerda, é freada pela força e depois passa a se a mesma nos dois riângulos:

mover para a direia.

$W = \Delta E_{mec}$

- - - /Sistema

,,.

'

8-7 Trabalho Realizado por uma Força xterna

/

"

I

**

. I

1

sobre um Sistema

' ,

1

*,V positivo *

/

No Capítulo 7, deinimos o rablho como a energia ransferida para um objeto ou

\

/

' - -,

de um objeto através de uma força que age sobre o sistema. Podemos agora estender

(a)

essa definição para uma força externa que age sobre um sistema de objetos.

,

/

/ Siste1na

,.

' "

I

\

,

1

1

Trabalho é a energia ransferida para um sistema ou de um sistema através de uma

[illegible]

,

1

Wnegativo 1

1

força extea que age sobre o sistema.

1

/

\

/

' ___ ,

.

(b)

A Fig. 8-1 la mosra um trabalho posiivo (uma transferência de energia para um Figura 8-11 (a) O rabalho positivo W sistema) e a Fig. 8-1 lb mostra um rabalho negativo (uma transferência de enrgia realizado sobre um sisema corresponde de um sistema). Quando mais de uma força age sobre um sistema, o trabalho total a uma transferência de energia para

dessas forças é igual à energia ransferida para o sistema ou reirada do sistema.

o sistema. (b) O trabalho negaivo W

Essas transferências são semelhantes à movimentação de dinheiro em uma

corresponde a uma transferência de

energia para fora do sistema.

conta bancária aravés de depósitos e saques. Se um sistema contém uma única

parícula ou um único objeto que se comporta como uma parícula, como no Capítulo 7, o rabalho realizado por uma força sobre o sistema pode mudar apenas a eneria cinéica do sistema. Essa mudança é governada pelo teorema do rabalho e

energia cinética expresso pela Eq. 7-10 (M =), ou seja, uma partícula isolada

possui um único tipo de energia na conta, a energia cinética. Forças externas podem apenas transferir energia para essa conta ou reirar energia dessa conta. Se um sistema é mais complicado, porém, uma força extena pode alterar ouras formas

de enegia (como a energia potencial), ou seja, um sistema mais complexo pode ter

várias contas de energia.

Vamos examinar as trocas de energia nesses sistemas mais complexos tomando como exemplo duas situações básicas, uma que não envolve o arito e oura que envolve o arito.

Sem Atrito

Em uma compeição de arremesso de bolas de boliche, você se agacha e coloca as

mãos em concha debaixo da bola. Em seguida, levanta-se rapidamente e ao mesmo

tempo levana os braços, lançando a bola quando as mãos atingem o nível do rosto.

Durante o movimento para cima, a força que você aplica à bola obviamente realiza

rabalho. Traa-se de uma força extena à bola que ransfere energia, mas para que

A força usada para levantar

sistema?

a bola transfere energia

para energia cinética e

Para responder a essa pergunta, vamos verificar quais são as enegias que muenergia potencial.

dam. Há uma variação .K da enegia cinéica da bola e, como a bola e a Terra icaram mais afastadas uma da outra, há também uma variação .U da energia potencial

,-Siste1na bola

--- ---z .

gravitacional do sistema bola-Terra. Para levar em conta as duas variações, é preciso

Terra

considerar o sistema bola-Terra. Assim, a força que você aplica é uma força extena

/

-.

/,

'

Figura 8-12 Um trabalho positivo W

onde E é a variação da energia mecnica do sistema. Essas duas equações, que

mec

é realizado sobre um sistema composto

estão representadas na Fig. 8-12, são equivalentes no caso de um trabalho realizado

por uma bola de boliche e a Tera,

por uma força externa sobre o sistema na ausência de atrito.

causando uma variação .Emec da energia

mecânica do sistema, uma variação

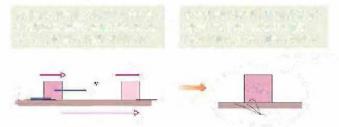
Com Atrito

.K da energia cinética da bola e uma

variação õ.U da energia potencial

Vamos agora considerar o exemplo da Fig. 8-13a. Uma força horizontal constante F

ravitacional do sistema.

puxa um bloco ao longo de um eixo x, deslocando-o de uma disância d e aumentando

$Fd = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + f_k d$

$\Delta E_t = f_k d$

A força aplicada fornece energia.

O trabalho realizado pela força

Figura 8-13 (a) Um bloco é puxado

A força de atrito transfere dessa

aplicada modifica a energia

por uma força F enquanto uma força de

energia para energia térmica.

mecânica e a energia térmica.

atrito cinético Jk se opõe ao movimento.

-

O bloco tem uma velocidade i0 no início

do deslocamento e uma velocidade i no

Vo

-

/ Sistema bloco-piso

escolher o bloco

como nosso sistema e aplicar a ele a segunda lei de Newton. Podemos escrever a lei

para as componentes ao longo do eixo x (F, •• _, = max) na forma

F-fk = ma.

(8-27)

Como as forças são constantes, a aceleração ã também é constante. Assim, podemos

usar a Eq. 2-16 para escrever

v2 = vã + ?ad.

Explicitando a nesta equação, substituindo o resultado na Eq. 8-27 e reagrupando

os termos, obtemos

(8-28)

1

1

ou, como - mv 2 - - mv6 = K para o bloco,

2

2

l•"d = t.K + fkd.

(8-29)

Em uma situação mais geral (na qual, por exemplo, o bloco está se movendo sobre

uma rampa), pode haver uma variação da energia potencial. Para levar em cona essa

possível variação, generalizamos a Eq. 8-29, escrevendo

Fd = 1E +

mec

fkd.

(8-30)

Observamos experimenalmente que o bloco e a parte do piso ao longo da qual o

bloco se desloca icam mais quentes quando o bloco está se movendo. Como vamos

ver no Capítulo 18, a temperatura de um objeto está relacionada à sua enegia térmica E 1 (energia associada ao movimento aleatório dos átomos e moléculas do objeto).

Neste caso, a energia térmica do bloco e do piso aumenta porque (1) existe arito

e (2) há movimento. Lembre-se de que o atrito é causado por soldas a frio entre as

duas superfícies. Quando o bloco desliza sobre o piso, as soldas são repetidamente

rompidas e refeitas, aquecendo o bloco e o piso. Assim, o deslizamento aumenta a

energia térmica E 1 do bloco e do piso.

Experimentalmente, observa-se que o aumento 1E1 da energia térmica é igual

ao produto do módulo da força de atrito cinéico, f' por d, o módulo do deslocamento: [illegible] da energia térmic,1 :ausado elo atrito).

(8-31)

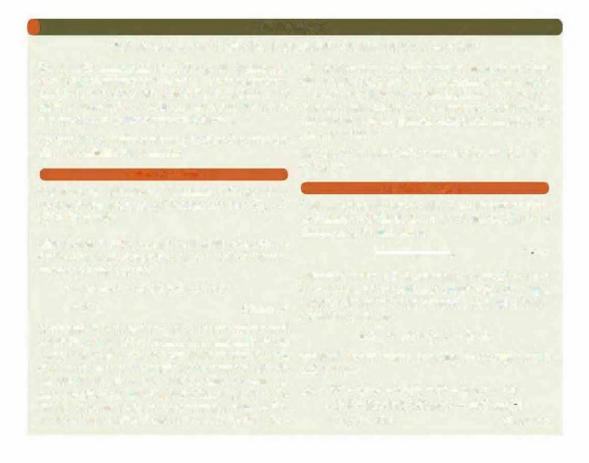
Assim, podemos escrever a Eq. 8-30 na forma

Pd = 1Enwc + 1Et.

(8-32)

Fd é o rabalho W realizado pela força extena F (a energia ransferida pela for

ça), mas sobre que sistema o trabalho é realizado (onde são feitas as transferências

de enrgia)? Para responder a essa pergunta, verificamos quais são as energias que

$$W = \Delta E_{mec} + \Delta E_t$$

$$W = \Delta E_{mec} + \Delta E_t.$$

variam. A energia mecânica do bloco varia e as enegias térmicas do bloco e do piso

também variam. Assim, o trabalho realizado pela força Fé realizado sobre o sistema

bloco-piso. Esse trabalho é dado por

(trabalho realizado ein um sistema coin atrito).

(8-33)

Esta equação, que está representada na Fig. 8-13b, é a deinição do rabalho realizado por uma força extena sobre um sistema no qual existe atrito.

TESTE 5

Em rês experimentos, um bloco é empurrado por uma força horizontal em um piso com

arito, como na Fig. 8-13a. O módulo F da força aplicada e o efeito da força sobre a velocidade do bloco são mosrados na tabela. Nos três experimentos, o bloco percorre a mesma disância d. Ordene os três experimentos de acordo com a variação da energia térmica do bloco e do piso, em ordem decrescente. -

Tentaiva

F

Velocidade do Bloco

a

5,0N

diminui

b

7,0N

permanece constante

c

8,0N

aumenta

Exemplo

Trabalho, atrito e variação da energia térmia de um caixote de repolhos

Um operário empurra um caixote de repolhos (massa toal velocidade aumentar. Como a velocidade do caixote está m = 14 kg) sobre um piso de concreto com uma força hori diminuindo, deve exisir arito e, portanto, deve ocorer zontal constante F de módulo 40 N. Em um deslocamento uma variação E, da energia térmica do caixote e do piso.

retilíneo de módulo d = 0,50 m, a velocidade do caixote Assim, o sistema sobre o qual o trabalho é realizado é o diminui de v0 = 0,60 m/s para v = 0,20 m/s.

sistema caixote-piso, já que as variações de energia ocor

(a) Qual foi o trabalho realizado pela força F e sobre que rem nesse sistema.

sistema o trabalho foi realizado?

(b) Qual é o aumento E, da energia térmica do caixote

e do piso?

IDEIA-C HAVE

Como a força aplicada F é constante, podemos calcu

IDEIA-CHAVE

lar o rabalho realizado pela força usando a Eq. 7-7 Podemos relacionar E, ao rabalho W realizado pela for

(W = Fd cos J).

ça F usando a defnição de energia da Eq. 8-33 para um

sistema no qual existe arito:

álculo Subsituindo os valores conhecidos e levando em

conta o fato de que a força F e o deslocamento d apontam

(8-34)

na mesma direção, temos:

os O valor de W foi calculado no item (a). Como a

W = P"d cos > = (40 N)(0.50 m) cos O"

eneria potencial não variou, a variação Emc da energia

mecânica do caixote é igual à variação da energia cinéica

= 20 J.

(Resposta) e podemos escrever:

Raciocíno Para determinar qual é o sistema sobre o qual

o trabalho é realizado, devemos examinar quais são as

AE - AK - 1mv2 - 1n1v2

u. mec - u. - 2

2 O·

energias que variam. Como a velocidade do caixote varia, Substituindo esta expressão na Eq. 8-34 e explicitando certamente existe uma variação .K da energia cinéica do E,, obtemos

caixote. Existe arito entre o piso e o caixote e, portanto,

uma variação da energia térmica? Observe que P e a ve .i = W - (itnv2 - [illegible] = -V - tni(v2 - vã) locidade do caixote apontam no mesmo senido. Assim,

= 20 J - !(14 kg)[(0.20 m/s)2 - (0,60 1n/s)2)

se não existisse atrito, F aceleraria o caixote, fazendo a

= 22.2 .J = 22 J.

(Resposta)

$$W = \Delta E = \Delta E_{\text{mec}} + \Delta E_{\text{t}} + \Delta E_{\text{int}},$$

8-8 Consevação da Energia

Já discutimos várias situações nas quais a energia era ransferida entre objetos e

sistemas, da mesma forma como o dinheiro é movimentado enre contas bancárias.

Em cada uma dessas situações, supusemos que a energia envolvida não variava, ou

seja, que uma parte da energia não podia aparecer ou desaparecer magicamente. Em

termos mais formais, supusemos (corretamente) que a energia obedecia a uma lei

conhecida como lei de conservação da energia, que se refere à eneria total E de um sistema. A energia toal é a soma da energia mecânica com a energia térmica e

qualquer ouro tipo de energia interna do sistema além da energia térmica. Esses

outros tipos de energia intena ainda não foram discutidos.) De acordo com a lei de

conservação da energia,

A energia total E de um sistema pode mudar apenas aravés da transferência de energia

para dentro do sistema ou para fora do sistema.

O único tipo de ransferência de energia que consideramos até agora foi o rabho

W realizado sobre um sistema. Assim, para nós, neste ponto, a lei de conservação da energia estabelece que

(8-35)

onde 1Eec é a variação da energia mecânica do sistema, lE, é a variação da ener Figua 8-14 Para descer, a alpinista gia térmica do sistema e .Ein, é uma variação de qualquer ouro ipo de energia in precisa transferir energia da energia terna do sistema. Em .E 1

potencial gravitacional de um sistema

, estão incluídas as variações .K da energia cinética e as

variações .U da energia potencial (elástica, ravitacional, ou qualquer oura forma formado por ela, seu equipamento e a que exista).

Terra. Ela enrolou a corda em anéis de

Esta lei de conservação da energia não é algo que deduzimos a partir de prin metal para que haja atrito entre a corda e cípios básicos da ísica, mas se baseia em resultados experimentais. Os cienisas e os anéis. Isso faz com que a maior parte engenheiros nunca encontraram uma exceção.

da energia potencial ravitacional seja

ransferida para a energia térmica da

corda e dos anéis e não para a energia

Sistema Isolado

cinéica da alpinista. (yler Stablefordl

Um sistema isolado não pode rocar energia com o ambiente. Nesse caso, a lei de he Image Ban/Gety Images) conservação da energia pode ser expressa da seguinte forma:

A energia total, E, de um sistema isolado não pode variar.

Muitas transferências de energia podem acontecer dentro de um sistema isolado,

como, por exemplo, entre energia cinética e alguma forma de energia potencial ou

entre energia cinética e energia térmica. Enretanto, a energia total do sistema não

pode variar.

Para dar um exemplo, considere a alpinisa da Fig. 8-14, seu equipamento e a

Terra como um sistema isolado. Enquanto a jovem desce a encosta da montanha, fazendo variar a configuração do sistema, precisa conrolar a ransferência de energia potencial do sistema. (Essa energia não pode simplesmente desaparecer.) Parte da

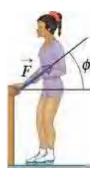
energia potencial é converida em energia cinética. Enretanto, a alpinista não quer

transferir muita energia para esta forma, pois, nesse caso, passaria a se mover muito depressa. Por essa razão, passa a corda por argolas de metal de modo a produir arito enre a corda e as argolas durante a descida. A passagem da corda pelas argolas

transfere energia potencial gravitacional do sistema para energia térmica das argolas

e da corda de uma forma controlável. A energia total do sistema alpinista-equipamento-Terra (a soma das energias potencial ravitacional, cinéica e térmica) não varia durante a descida.

$$\Delta E_{mec} + \Delta E_t + \Delta E_{int} = 0$$

$$E_{mec,2} = E_{mec,1} - \Delta E_t - \Delta E_{int}.$$

No caso de um sistema isolado, a lei de conservação da energia pode ser escrita

de duas formas. Primeiro, fazendo W = O na Eq. 8-35, obtemos

(sisrcmu isolado).

(8-36)

Podemos também fazer .Emec = Emec 2 -

'

Emec 1,

. onde os índices 1 e 2 se referem a dois

insantes diferentes, antes e depois da ocorrência de um certo processo, digamos.

Nesse caso, a Eq. 8-36 se torna

(8-37)

De acordo com a Eq. 8-37:

Em um sistema isolado, podemos relacionar a energia toal em um dado instante à

energia total em outro insante sem considerar a enegia em instantes intermediários.

Este fato pode ser uma feramenta poderosa para a solução de problemas que envolvem sistemas isolados quando precisamos relacionar as formas de energia que um sistema possui antes e depois de um certo processo.

Na Seção 8-5, discutimos uma situação especial de sistemas isolados, aquela

na qual forças dissipativas (como a força de arito cinéico) não atuavam no sistema

Nesse caso especial, lE, e .Ein, são nulas e a Eq. 8-37 se reduz à Eq. 8-18. Em ouras palavras, a energia mecânica de um sistema isolado é conservada quando não existem forças dissipativas atuando no sistema.

Foras Etenas e Transferências Internas de Energia

Uma força extena pode mudar a energia cinéica ou a energia potencial de um objeto sem realizar rabalho sobre o objeto, ou seja, sem transferir energia para o objeto. Em vez disso, a força se limita a transferir energia de uma forma para oura no interior do objeto.

A Fig. 8-15 mosra um exemplo. Uma patinadora, inicialmente em repouso, empurra uma barra e passa a deslizar sobre o gelo (Figs. 8-1 Sa e b). A energia cinéica da painadora aumenta porque a bara exerce uma força extena P sobre a patinadora.

Entretanto, a força não ransfere energia da barra para a patinadora e, portanto, não

realiza rabalho sobre a patinadora; o aumento da energia cinética se deve a ransferências intenas a parir da energia bioquímica dos músculos da moça.

A Fig. 8-16 mosra ouro exemplo. Um motor de combustão intena aumenta

a velocidade de um carro que possui ração nas quaro rodas (as quatro rodas são

acionadas pelo motor). Durante a aceleração, o motor faz os pneus empurrarem o

pavimento para rás. Este empurrão dá origem a uma força de atrito J que empurra

os pneus para a rente. A força extena resultante F exercida pelo pavimento, que é

a soma dessas forças de arito, acelera o carro, aumentando sua energia cinéica. En-

Figua 8-15 (a) Quando uma

O empurrão na barra causa

patinadora empurra uma barra,

uma transferência de energia

a barra exerce uma força F

Gelo

d

X

muda de v 0(= O) para v por causa

(e)

da componente horizonal de F.

(a)

(b)

tretanto, F não transfere enrgia do pavimento para o carro e, portanto, não realiza

trabalho; o aumento da energia cinética do carro se deve à ransferência de energia

intena armazenada no combusível.

Em situações semelhantes a essas duas, às vezes podemos relacionar a força ex

f

-

tena F que age sobre um objeto à variação da energia mecânica do objeto se conse

=

f

guirmos simpliicar a situação. Considere o exemplo da patinadora no gelo. Enquanto

ela empurra o corrimão e percorre a distância d da Fig. 8-15c, podemos simplii Figua 8-16 Um carro acelera para a direita usando tração nas quaro rodas. O

car a situação supondo que a aceleração é consante, com a velocidade variando de pavimento exerce quao forças de atrito v0 = O para v. (Isso equivale a supor que o módulo e a orientação deF são constantes.) (duas das quais aparecem na figura) Após o empurrão, podemos simpliicar a situação considerando a painadora como sobre a parte inferior dos pneus. A soma uma parícula e desprezando o fato de que o esforço muscular aumentou a enrgia dessas quatro forças é a força extena térmica do corpo da patinadora, além de alterar ouros parâmeros fisiológicos. Sendo resultante F que age sobre o carro.

assim, podemos aplicar a Eq. 7-5 (.mv 2 - [illegible] = :d) e escrever

2

2

K - K0 = (Fcos ,)d,

ou

.K = Fd cos J.

(8-38)

Se a situação também envolve uma mudança da altura em que se encontra o

objeto, podemos levar em conta a variação iU da energia potencial raviacional

escrevendo

.V+ M = F•d cos).

(8-39)

A força do lado direito desta equação não realiza trabalho sobre o objeto, mas é responsável pelas variações de energia que aparecem do lado esquerdo da equação.

Potência

Agora que sabemos que uma força pode ransferir energia de uma forma para oura

sem realizar rabalho, podemos ampliar a deinição de potência apresentada no

capítulo anterior. Na Seção 7-9, a potência foi deinida como a taxa com a qual

uma força realiza rabalho. Em um sentido mais geral, a potência P é a taxa com a

qual uma força ransfere energia de uma forma para oura. Se uma certa quantidade

de eneria E é transferida durante um intervalo de tempo it, a potência média desenvolvida pela força é dada por

.E

P éd = .(.

(8-40)

Analogamente, a potência instantânea desenvolvida pela força é dada por

dE

p = dt .

(8-41)

Exemplo

Energia, atrito, mola e pamonha

Na Fig. 8-17, um pacote com 2,0 kg de pamonha, de o instante em que começa a ser comprimida e o instante pois de deslizar sobre um piso com velocidade v1 = 4,0 em que o pacote para?

ls, choca-se com uma mola, comprimindo-a até ficar

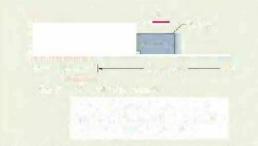
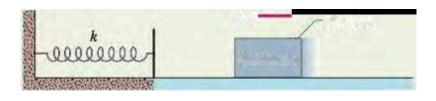
momentaneamente em repouso. Até o ponto em que o

IDEIAS-CHAVE

pacote enra em contato com a mola inicialmente relaxa Precisamos examinar todas as forças para determinar se da, o piso não possui arito, mas enquanto o pacote está temos um sistema isolado ou um sistema no qual uma força comprimindo a mola, o piso exerce sobre o pacote uma extena está realizando trabalho.

força de atrito cinético de módulo 15 N. Se k = 10.000

Forças A força normal exercida pelo piso sobre opaco

N/m, qual é a variação d do comprimento da mola entre te não realiza rabalho porque a direção da força é sempre

em repouso e a mola foi comprimida de uma distância

1- Atrito -1

Sem atrito

d. Para os dois estados, a energia mecânica do sistema

-

-

--i

l---

Parada d Pritneiro contato

é a soma da energia cinética do pacote (K = .mv2) com

2

No trecho com atrito, a energia

a energia potencial da mola (U = !.x2). No estado 1,

cinética é transferida para energia

2

potencial e energia térmica.

U = O (pois a mola não está comprimida) e a velocidade

do pacote é v1• Assim, temos:

Figura 8-17 Um pacote desliza sobre um piso sem arito com

velocidade i em direção a uma mola de constante elástica k.

Enec.l = K 1 + U1 = }niv1 + O.

1

Quando o pacote entra em conato com a mola, uma força de

arito do piso passa a auar sobre o pacote.

No estado 2, K = O (pois o pacote está parado) e a variação

de comprimento da mola é d. Assim, temos:

perpendicular à direção de deslocamento do pacote. Pela

Emc.l = Ki + Ui = 0 + tkd 2.

mesma razão, a força gravitacional também não realiza Finalmente, usando a Eq. 8-31, podemos substiuir a vatrabalho sobre o pacote. Enretanto, enquanto a mola está riação M, da energia térmica do pacote e do piso por .d.

sendo comprimida, uma força elástica realiza rabalho so Nesse caso, a Eq. 8-42 se tona

bre o pacote, ransferindo enegia para a energia potencial

elástica da mola A força da mola também empurra uma

f kd2 = t,n 11 1 -. d.

parede rígida. Como existe arito enre o pacote e o piso,

o deslizamento do pacote sobre o piso aumenta a enegia Reagrupando os termos e substituindo os valores conhetérmica do pacote e do piso.

cidos, temos:

Sistema O sistema pacote-mola-piso-parede, que in

5000d2 + l5d - 16 = o.

clui todas essas forças e ransferências de energia, é um

sistema isolado. Assim, a energia total não varia e pode Resolvendo esta equação do segundo grau, obtemos: mos aplicar ao sistema a lei de conservação da energia na

d = 0,055 m = 5,5 cm.

(Resposta)

forma da Eq. 8-37:

(8-42)

REVISÃO E RESUMO

Forças Conservativas Uma força é uma força conservaiva se Energia Potencial Gravitacional A energia potencial associada o rabalho que realiza sobre uma partícula se anula ao longo de um a um sistema constituído pela Terra e uma partícula próxima é percurso fechado. Podemos dizer também que uma força é conserva chamada de energia potencial gravitacional. Se uma partícula se tiva se o rabalho que realiza sobre uma partícula que se move entre desloca de uma altura Y; para uma alura y dois pontos não depende da rajetóia seguida pela parícula. A força

t a variação da energia

potencial gravitacional do sistema partícula-Terra é dada por

ravitacional e a foça elástica são foças conservativas; a força de

atrito cinético é uma força dissipativa (não conservativa).

.U = 1ng(y1-Y;) = mg ly.

(8-7)

Se o ponto de referência de uma parícula é tomado como Y; =

Energia Potencial A eneria potencial é a energia associada O e a energia potencial gravitacional correspondente do sistema é à coniguração de um sistema submetido à ação de uma força tomada como U; = O, a energia potencial gravitacional U de uma conservativa. Quando a força conservativa realiza um trabalho W partícula a uma alura y é dada por sobre uma partícula do sistema, a variação lU da energia potencial

do sistema é dada por

U(y) - n1gy.

(8-9)

.U = -W.

(8-1) Energia Potencial Elástica A Energia potenial elásica é

a energia associada ao estado de compressão ou distensão de um

Se a partícula se desloca do ponto X; para o ponto xt a variação de objeto elástico. No caso de uma mola que exerce uma força elástica energia potencial do sistema é

F = -x quando a extremidade livre sore um deslocamento x, a energia potencial elástica é dada por

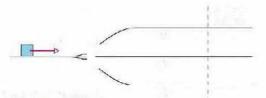
.U = - F(x) dx.

(8-6)

f"r

r,

U(x) = [illegible]

(8-1 1)

$K_2 + U_2 = K_1 + U_1,$

$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0.$

$\Delta E_t = f_k d.$

$\Delta E_{mec} + \Delta E_t + \Delta E_{int} = 0$

PARTE 1

ENERGIA POTENCIAL E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

193

Na coniguração de referênia, quando a mola está no estado atrito, o trabalho realizado sobre o sistema e a variação .Emc da relaxado, x = O e

U = O.

energia mecânica do sistema são iguais:

w -

Energia Mecânica A eneria mecânica E

AEm,c = AK + AU.

(8-26, 8-25)

111c de um sistema é a

soma da energia cinéica K com a energia potencial U do sistema: Quando uma força de atrito cinético age dentro do sistema, a energia E

térmica E, do sistema varia. (Esta energia está associada ao movimuu - K + U.

(8-12) mento aleatório dos átomos e moléculas do sistema.) Nesse caso, o

Sistema isolado é um sisema no qual nenhuma força externa produz trabalho realizado sobre o sistema é dado por variações de energia. Se apenas forças conservativas realizam trabalho

em um sistema isolado, a energia mecânica E,é do sistema não pode

\f - AEmcc + At:,.

(8-33)

variar. Este pincípio de conservação da energia mecânica pode

ser escrito na forma

A variação M, está relacionada ao módulo Ík da orça de atrito e

ao módulo d do deslocamento causado pela força extena através

(8-17) da equação

onde os índices se referem a diferentes instantes de um processo

(8-31)

de transferência de energia. Este princípio de conservação pode

também ser escrito na forma

Conservação da Energia A eneria otal E de um sistema

(a soma da energia mecânica e das energias intenas, incluindo a

(8-18) energia térmica) só pode variar se uma certa quantidade de energia

Cuvas de Energia Potencial Se conhecemos a função energia é transferida para o sistema ou reirada do sistema. Este fato expepotencial U(x) de um sistema no qual uma força unidimensional rimental é conhecido como lei de conservação da eneria. Se um F(x) age sobre uma partícula, podemos determinar a força usando trabalho W é realizado sobre o sistema, a equação

*W = ÂE = [illegible] [illegible] [illegible]

(8-35)

F(x) = _ dU(x) .

dx

(8-22) Se o sistema é isolado (W = O), isso nos dá

Se U(x) é dada na forma de um gráfico, para qualquer valor de x, a

(8-36)

força F(x) é o negativo da inclinação da curva no ponto considerado e

E

(8-37)

e a energia cinética da partícula é dada por

[illegible] = E1cc, 1 - AE, - AE1ni,*

onde os índices 1 e 2 indicam dois instantes diferentes.

K(x) = E,r,cc - U(x),

(8-24)

onde E"'"" é a energia mecânica do sistema. Um ponto de retono é Potência A potência desenvolvida por uma força é a taxa com a um ponto x no qual o movimento de uma partícula muda de sentido qual essa força transfere energia. Se uma certa quantidade de ener

(nesse ponto, K = O). A partícula se enconra em equihôrio nos gia .E é transferida por uma força em um intervalo de tempo l.t, a pontos onde a inclinação da curva de U(x) é nula [nesses pontos, potência média desenvolvida pela força é dada por F(x) = O].

AE

Trabalho Realizado sobre um Sistema por uma Força

p!d = .t

(8-40)

Externa O trabalho W é a energia transferida para um sistema A potência instantânea desenvolvida por uma força ou de um sistema por uma força extena que age sobre o sistema.

é dada por

Quando mais de uma força externa age sobre o sistema, o trabalho

dE

(l)

<

V

5 3

(2)

1

o 1

X

A B

e D

E F

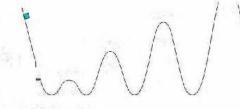
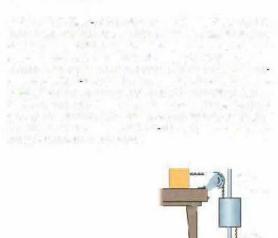
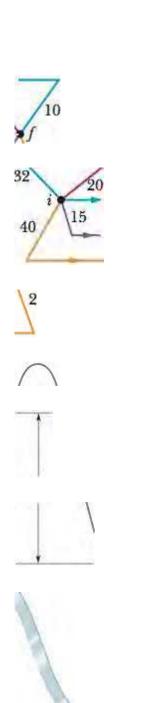
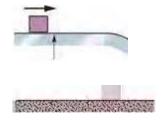
G H

Figura 8-18 Pergunta 1.

(3)

Figura 8-19 Pergunta 2.

10
f
32
20
i
15
40
2

C
D

partícula (b) ique aprisionada no poço de potencial da esquerda, (c) 6 Na Fig. 8-23a, você puxa para cima uma corda presa a um cilinique aprisionada no poço de potencial da direita e (d) seja capaz de dro que desliza em relação a uma haste cenral. Como o cilindro e se mover entre os dois poços, mas sem ultrapassar o ponto '? Para a haste se encaixam sem folga, o atrito é considerável. A força que a situação do item (d), em qual das regiões BC, DE e FG a parícula você aplica realiza um trabalho W = + 100 J sobre o sistema cilinpossui (e) a maior energia cinética e () a menor velocidade?

droeixo-Terra (Fig. 8-23b). Um "balanço de energia" do sistema

3 A Fig. 8-20 mosra um caminho direto e quaro caminhos indire é mosrado na Fig. 8-23c: a energia cinéica K aumena de 50 J e a tos do ponto i ao ponto f Ao longo do caminho direto e de rês dos energia potencial gravitacional [illegible] aumenta de 20 J. A única oura caminhos indiretos, apenas uma força conservativa F

vaiação da energia denro do sistema é a da energia térmica E,. Qual

c age sobre um

certo objeto. Ao longo do quarto caminho indireto, tanto F

é a variação .E,?

c como

uma força dissipativa Fd agem sobre o objeto. A variação .E .. c da

1

1 Sistema

M= +50 J

- 3 0

Cilindro

J

1

1

1

.U = +20 J

J

1

g

- 6

1

' I

, Terra 1

[illegible]

- 10

7

(a)

(b)

(e)

Figura 8-20 Pergunta 3.

- 3 0

Figura 8-23 Pergunta 6.

4 Na Fig. 8-21, um pequeno bloco, inicialmente em repouso, é 7 O arranjo da Fig. 8-24 é semelhante ao da Prgunta 6. Agora, você liberado em uma rampa sem atrito a uma altura de 3,0 m. As altu puxa para baixo uma corda que esá presa ao cilindro que desliza com ras das elevações ao longo da rampa estão indicadas na figura. Os arito em relção à haste central. Além disso, ao descer, o cilindro cumes das elevações são todos iguais, de forma circular, e o bloco puxa um bloco aravés de uma segunda corda e o faz deslizar em uma não perde conato com o piso em nenhuma das elevações. (a) Qual bancada. Considere novamente o sistema cilindroeixo-Terra, seme

é a primeira elevação que o bloco não consegue superar? (b) O que lhante ao da Fig. 8-23b. O rabalho que você realiza sobre o sistema acontece com o bloco em seguida? No cume de que elevação (c) a é 20 J. O sistema realiza um trabalho de 60 J sobre o bloco. Denro aceleração centrípeta do bloco é máxima e (d) a força normal sobre do sistema, a energia cinéica aumenta de 130 J e a energia potencial o bloco é mínima?

graviacional diminui de 20 J. (a) Escreva um "balanço de energia"

3,5

para o sisema, semelhante ao da Fig. 8-23c. b) Qual é a vari

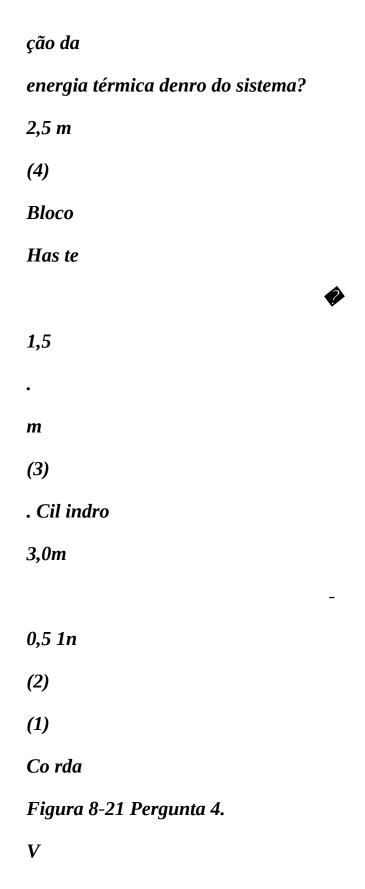
m

ção da

energia térmica denro do sistema?

Figura 8-21 Pergunta 4.

V

t

5 Na Fig. 8-22, um bloco desliza de A para C em uma rampa sem Figura 8-24 Pergunta 7.

'

'

arito e depois passa para uma região horizontal CD onde está sujeito

a uma força de atrito. A energia cinética do bloco aumenta, diminui

ou permanece constante (a) na região AB, (b) na região BC e (c) na 8 Na Fig. 8-25, um bloco desliza em uma pisa que desce uma altura

h.

região CD? (d) A energia mecânica do bloco aumenta, diminui ou

A pista não possui atrito, exceto na parte mais baixa. Nessa parte,

permanece consante nessas regiões?

o bloco desliza até parar, devido ao atrito, depois de percorrer uma

distância D. (a) Se diminuímos h, o bloco percorre uma distância maior, menor ou igual a D até parar? (b) Se, em vez disso, aumentamos a massa do bloco, a distância que o bloco percorre até parar

A

é maior, menor ou igual a D?

•

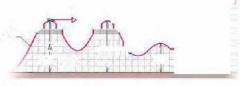
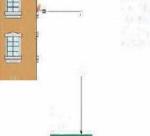
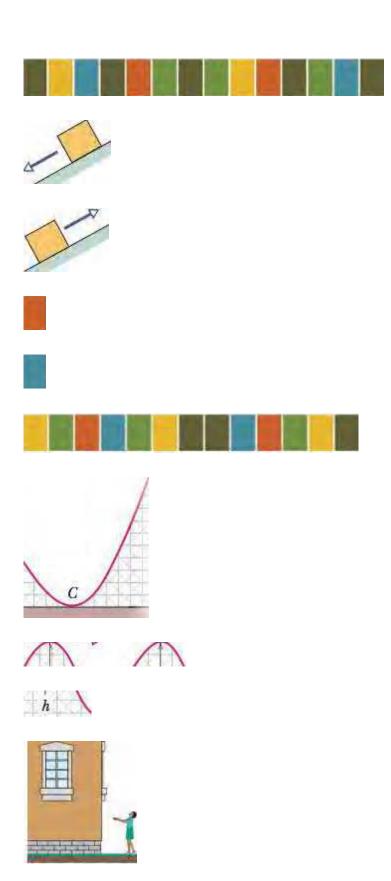
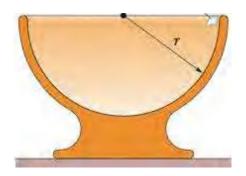
h

-n1

l

B

Figura 8-22 Pergunta 5.

Figura 8-25 Pergunta 8.

***9** A Fig. 8-26 mostra três situações que envolvem um plano com*

atrito e um bloco que desliza sobre um plano. O bloco começa com

a mesma velocidade nas três situações e desliza até que a força de

-->

atrito cinético o faça parar. Ordene as situações de acordo com o

aumento da energia térmica devido ao deslizamento, em ordem de

(1)

(2)

(3)

crescente.

Figura 8-26 Pergunta 9.

P R O B L E M A S

1

• -- O número de pontos india o grau de diiculdade do problema

-

Informações adicionais disponívei s em O Circo Voador da Física de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 8-4 Cálculo da Energia Potencial

de comprimento L = 0,452 m e massa desprezível. A outra extr e

•1 Qual é a constante elástica de uma mola que armazena 25 J de midade da haste é ariculada, de modo que a bola pode se mover energia potencial ao ser comprimida 7,5 cm?

em uma circunferência vertical. A haste é mantida na posição ho

•2 Na Fig. 8-27, um carro de montanha-russa de massa m = 825 kg rizontal, como na igura, e depois recebe um impulso para baixo atinge o cume da primeira elevação com uma velocidade v

com força suiciente para que a bola passe pelo ponto mais baixo

0 = 17 ,O /s

a uma altura h = 42,0 m. O atrito é desprezível. Qual é o trabalho da circunferência e continue em movimento até chegar ao ponto realizado sobre o carro pela força ravitacional enre este ponto e mais alto com velocidade nula. Qual é o trabalho realizado sobre a (a) o ponto A, (b) o ponto B e (c) o ponto C? Se a energia poten bola pela força gravitacional do ponto inicial até (a) o ponto mais cial ravitacional do sistema carro-Terra é tomada como nula em baixo, (b) o ponto mais alto, (c) o ponto à direia na mesma alura C, qual é o seu valor quando o carro está (d) em B e (e) em A? Se a que o ponto inicial? Se a energia potencial gravitacional do sistema massa m é duplicada, a variação da energia potencial gravitacional bola-Terra é tomada como zero no ponto inicial, determine o seu do sistema enre os pontos A e B aumenta, diminui ou permanece valor quando a bola ainge (d) o ponto mais baixo, (e) o ponto mais a mesma?

alto e () o ponto à direita na mesma altu.ra que o ponto inicial. (g)

Suponha que a haste tenha recebido um impulso maior e passe pelo

ponto mais alto com uma velocidade diferente de zero. A variação

.

.U

vo

8 do ponto mais baixo ao ponto mais alto é maior, menor ou a

A

mesma que quando a bola chegava ao ponto mais alto com veloci

Primeia

dade zero?

eleação

B

r

--

h/2

L

Figura 8-27 Problemas 2 e 9.

Figura 8-29 Problemas 4 e 14.

•3 Você deixa cair um livro de 2,00 kg para uma amiga que está

na calçada, a uma distância D = 10,0 m abaixo de você. Se as mãos •5 Na Fig. 8 -30, um loco de gelo de 2,00 g é liberado na borda de estendidas da sua amiga estão a uma distância d = 1,5 m acima do uma taça hemisférica com 22,0 cm de raio. Não há arito no contato solo (Fig. 8-28), (a) qual é o rabalho W

do loco com a taça. (a) Qual é o rabalho realizado sobre o loco pela

x realizado sobre o livro

pela força gravitacional até o livro cair nas mãos da sua amiga? (b) força ravitacional durante a descida do loco até o fundo da taça?

Qual é a variação .U da energia potencial gravitacional do sistema (b) Qual é a variação da energia potencial do sistema loco-Tera livro-Terra durante a queda? Se a energia potencial graviacional durante a descida? (c) Se essa energia potencial é tomada como

U do sistema é considrada nula

nula no fundo da taça, qual é seu valor quando o loco é solto? (d)

no nível do solo, qual é o valor

Se, em vez disso, a energia potencial é tomada como nula no ponde U (c) quando você deixa cair to onde o loco é solto, qual é o seu valor quando o loco ainge o

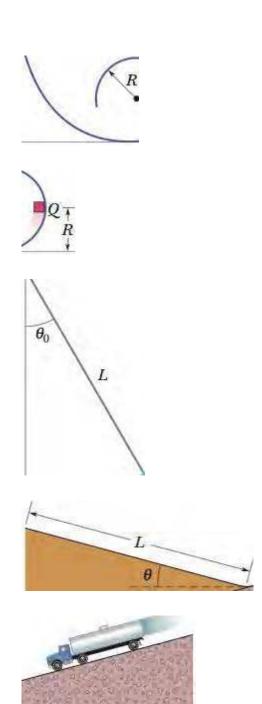
o livro e (d) quando o livro che-

fundo da taça? (e) Se a massa do loco fosse duplicada, os valores

ga às mãos da sua amiga? Supo-

das respostas dos itens de (a) a (d) aumentariam, diminuiriam ou

nha agora que o valor de U seja

permaneceriam os mesmos?

••6 Na Fig. 8-31, um pequenoblocode massam = 0,032kgpode Seção B-5 Conservação da Energia Mecânica deslizar em uma pista sem arito que forma um loop de raio R = 12 cm. •9 No Problema 2, qual é a velocidade

do carro (a) no ponto A, (b) O bloco é liberado a partir do repouso no ponto P, a uma altura h = no ponto B e (c) no ponto ? (d) Que alura o carro alcança na úl5,0R **acima do ponto mais baixo do *loop.* Qual é o trabalho realizado tima elevação, que é alta demais para ser ransposa? (e) Se o carro sobre o bloco pela força ravitacional quando o bloco se desloca tivesse uma massa duas vezes maior, quais seriam as resposas dos do ponto *P* para (a) o ponto *Q* e (b) o ponto mais alto do *loop?* Se itens (a) a (d)?**

a energia potencial gravitacional do sistema bloco-Terra é tomada

como zero no ponto mais baixo do *loop,* qual é a energia potencial •10 (a) No Problema 3, qual é a velocidade do livro ao chegar às quando o bloco se encontra (c) no ponto *P,* (d) no ponto *Q* e (e) no mãos da sua amiga? (b) Se o livro tivesse uma massa duas vezes ponto mais alto do *loop?* () Se, em vez de ser simplesmente libe maior, qual seria a velocidade? (c) Se o livro fosse aremessado para rado, o bloco recebe uma velocidade inicial para baixo ao longo da baixo, a resposta do item (a) aumenria, diminuiria ou permanecepista, as respostas dos itens de (a) a (e) aumentam, diminuem ou ria a mesma?

permanecem as mesmas?

• 1 1 (a) No Problema 5, qual é a velocidade do loco de gelo ao

chegar ao fundo da taça? (b) Se o loco de gelo tivesse o dobro da

 p

massa, qual seria a velocidade? (c) Se o floco de gelo tivesse uma

velocidade inicial para baixo, a resposta do item (a) aumentaria,

diminuiria ou permaneceria a mesma?

•12 (a) No Problema 8, usando técnicas de energia em vez das

h

técnicas do Capítulo 4, determine a velocidade da bola de neve ao

chegar ao solo. Qual seria essa velocidade (b) se o ângulo de lan

çamento fosse mudado para 41,0º *abaxo* da horizontal e (c) se a

massa fosse aumentada para 2,50 kg?

Figura 8-31 Problemas 6 e 17.

• 13 Uma bola de gude de 5 ,O g é lançada verticalmente para cima

usando uma espingarda de mola. A mola deve ser comprimida de

exatamente 8,0 cm para que a bola alcance um alvo colocado 20 m

••7 A Fig. 8-32mostra uma haste ina, de comprimentoL = 2,00m acima da posição da bola de gude na mola comprimida. (a) Qual é e massa desprezível, que pode girar em tono de uma das extremida a variação *lUK* da energia potencial gravitacional do sistema bola des para descrever uma circunferência vertical. Uma bola de massa de gude-Tera durante a subida de 20 m? (b) Qual é a variação *.U,*

***m* = 5,00 kg está presa na outra extremidade. A haste é puxada la da energia potencial elásica da mola durante o lançamento da bola teralmente até fazer um ângulo 8**

de gude? (c) Qual é a consante elástica da mola?

0 = 30,0º com a vertical e liberada

com velocidade inicial v *0* = O. Quando a bola desce até o ponto mais •14 (a) No Problema 4, qual deve ser a velocidade inicial da bola baixo da circunerência, (a) qual é o rabalho realizado sobre a bola para que ela chegue ao ponto mais alto da circunferência com v e pela força gravitacional e (b) qual é a variação da energia potencial locidade escalar zero? Nesse caso, qual é a velocidade da bola (b) do sistema bola-Terra? (c) Se a energia potencial gravitacional é no ponto mais baixo e (c) no ponto à direita na mesma altura que tomada como zero no ponto

mais baixo da circunferência, qual é o ponto inicial? (d) Se a massa da bola fosse duas vezes maior, as seu valor no momento em que a bola é liberada? (d) Os valores das respostas dos itens (a) a (c) aumentariam, diminuiriam ou permarespostas dos itens de (a) a (c) aumentam, diminuem ou permaneneceriam as mesmas?

cem os mesmos se o ângulo 80 é aumentado?

•15 Na Fig. 8-33, um caminhão perdeu os freios quando estava

descendo uma ladeira a 130 /h e o motorista dirigiu o veículo para uma rampa de emergência sem atrito com uma inclinação J = 15°. A massa do caminhão é 1,2 X 104 kg. (a) Qual é o m e nor comprimento *L* que a rampa deve ter para que o caminhão pare (momentaneamente) antes de chegar ao inal? (Suponha que

o caminhão pode ser ratado como uma parícula e justifique essa

suposição.) O comprimento mínimo *L* aumenta, diminui ou permanece o mesmo (b) se a massa do caminhão for menor e (c) se a velocidade for menor?

m

Figura 8-32 Problemas 7, 18 e 21.

••8 Uma bola de neve de 1,50 kg é lançada de um penhasco de 12,5

m de altura. A velocidade inicial da bola de neve é 14,0 m/s, 41,0º

acima da horizonal. (a) Qual é o rabalho realizado sobre a bola de Figura 8-33 Problema 15.

neve pela força gravitacional durante o percurso até um terreno plano, abaixo do penhasco? (b) Qual é a variação da energia potencial • • 16 Um bloco de 700 g é liberado a partir do repouso de uma do sistema bola de neve-Terra durante o percurso? (c) Se a energia altura *h0* acima de uma mola vertical com constante elástica *k* =

potencial gravitacional é tomada como nula na altura do penhasco, 400 N/m e massa desprezível. O bloco se choca com a mola e para qual é o seu valor quando a bola de neve chega ao solo?

momentaneamente depois de comprimir a mola 19,0 cm. Qual é o

PARTE 1

ENERGIA POTENCIAL E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

197

rabalho realizado (a) pelo bloco sobre a mola e b) pela mola sobre o bloco? (c) Qual é o valor de h0? (d) Se o bloco fosse solto de uma altura 2,00h0 acima da mola, qual seria a máxima compressão

da mola?

H

••17 No Problema 6, qual é o módulo da componente (a) hori

_ l _________

zontal e (b) vertical da força *resultante* que atua sobre o bloco no

ponto Q? (c) De que altura *h* o bloco deveria ser liberado, a partir

do repouso, para icar na iminência de perder contato com a superfície no alto do *loop? (Iminência de perder o contato* signiica Figura 8-35 Problema 22.

que a força normal exercida pelo *loop* sobre o bloco é nula nesse

instante.) (d) Plote o módulo da força normal que age sobre o blo ••23 A corda da Fig. 8-36, de compimento *L* = 120 cm, possui co no alto do *loop* em função da altura inicial *h*, para o intervalo uma bola presa em uma das exremidades e esá ixa na outra exde *h* = O a *h* = *6R*.

tremidade. A distância *d* da extremidade ixa a um pino no ponto

••18 (a) No Problema 7, qual é a velocidade da bola no ponto *Pé* 75,0 cm. A bola, inicialmente em repouso, é liberada com o io mais baixo? (b) Essa velocidade aumena, diminui ou permanece a na posição horizonal, como mostra a igura, e percorre a rajetóia mesma se a massa aumena?

indicada pelo arco racejado. Qual é a velocidade da bola ao atingir

••19 A Fig. 8-34 mosra ua pedra de 8,00 kg em repouso sobre (a) o ponto mais baixo da rajetória e (b) o ponto mais alto depois uma mola. A mola é comprimida 10,0 cm pela pedra. (a) Qual é a que a corda encosta no pino?

constante elástica da mola? (b) A pedra é empurrada mais 30 cm

-- - L-

-

-<•1

para baixo e liberada. Qual é a energia potencial elástica da mola

comprimida antes de ser liberada? (c) Qual é a variação da energia

1

potencial gravitacional do sistema pedra-Terra quando a pedra se

r -

1

1

1

desloca do ponto onde foi liberada até a alura máxima? (d) Qual é

1

d

1

essa altura máxima, medida a parir do ponto onde a pedra foi libe

**1 **

rada?

\ ' '

1

[illegible]

Figura 8-36 Problemas 23 e 70.

• •24 Um bloco de massa *m* = 2,0 kg é deixado cair de uma altu

Figua 8-34 Problema 19.

[illegible]

ra *h* = 40 cm sobre uma mola de constante elástica *k* = 1960 N/m (Fig. 8-37). Determine a variação máxima de comprimento da mola

• •20 Um pêndulo é formado por uma pedra de 2,0 kg oscilando na ao ser comprimida.

extremidade de uma corda de 4,0 m de comprimento e massa desprem

zível. A pedra tem uma velocidade de 8,0 m/s ao passar pelo ponto

T

mais baixo da rajetória. (a) Qual é a velocidade da pedra quando a

corda forma um ângulo de 60º com a vertical? (b) Qual é o maior

h

ângulo com a vertical que a corda assume durante o movimento da

_ l

pedra? (c) Se a energia potencial do sistema pêndulo-Terra é tomada sendo nula na posição mais baixa da pedra, qual é a energia mecânica total do sistema?

••21 A Fig. 8-32 mostra um pêndulo de comprimento *L* = Figura 8-37 Problema 24.

1,25 m. O peso do pêndulo (no qual está concentrada, para efeitos práticos, toda a massa) tem velocidade v0 quando a corda faz um ângulo 8

••25 Em *t* = O, uma bola de 1,0 kg é airada de uma torre com

0 = 40,0º com a vertical. (a) Qual é a velocidade do

A

A

peso quando está na posição mais baixa se v

i = (18 m/s)i + (24 m/s)j. Quanto é *lU* do sistema bola- *T*erra entre 0 = 8,00 m/s? Qual

é o menor valor de v

***t* = O e *t* = 6,0 s (ainda em queda livre)?**

0 para o qual o pêndulo oscila para baixo e

depois para cima (b) até a posição horizontal e (c) até a posição

-

A

••26 Ua força conservativa *F* = *(6,0x* -12)i N, onde *x* está em vertical com a corda esticada? (d) As respostas dos itens (b) e (c) meros, age sobre uma partícula que se move ao longo de um eixo aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas se 80 aumentar *x.* A energia potencial *U* associada a essa força recebe o valor de 27

de alguns graus?

J em *x* = O. (a) Escreva uma expressão para *U* como uma função

••22

. Um esquiador de 60 kg parte do repouso a uma altura de *x*, com *U* em joules e *x* em metros. (b) Qual é o máximo valor *H* = 20 m acima da extremidade de uma rampa para saltos de es positivo da energia potencial? Para que valor (c) negaivo e (d) poqui (Fig. 8-35) e deixa a

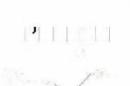
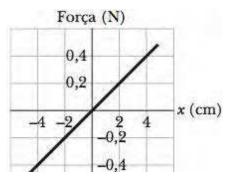
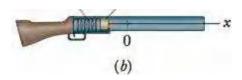
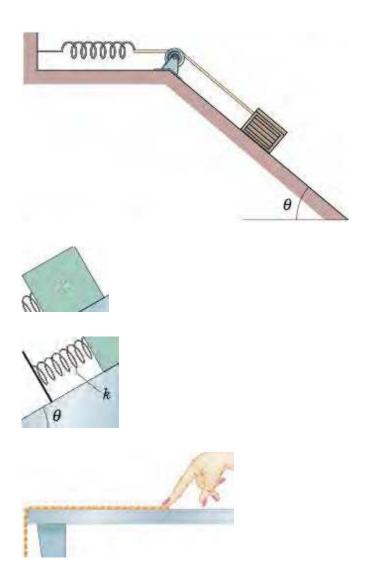
rampa fazendo um ângulo 8 = 28° com a sitivo de *x* a energia potencial é nula?

horizontal. Despreze os efeitos da resistência do ar e suponha que • •27 Tarzan, que pesa 688 N, salta de um penhasco pendurado na a rampa não tenha atrito. (a) Qual é a altura máxima *h* do salto em exremidade de um cipó com 18 m de compimento (Fig. 8 -38). Do relação à exremidade da rampa? (b) Se o esquiador aumentasse o alto do penhasco até o ponto mais baixo da rajetói, ele desce 3,2 m.

próprio peso colocando uma mochila nas costas, *h* seria maior, me O ció se romperá se a força exrcida sobre ele exceder 950 N. (a) O

nor ou igual?

ció se rompe? Se a respsta for negativa, qual é a maior força a que

(b)

é submetido o cipó? Se a respsta for mativa, qual é o ângulo que • •30 Uma caixa de pão de 2,0 kg sobre um plano inclinado sem ario cipó está fzendo com a vertical no momento em que se rome?

to de ângulo) = 40,0º está presa, por uma corda que passa por uma

polia, a uma mola de consante elásica *k* = 120 N/m, como mosra

a Fig. 8-41. A caixa é liberada a partir do repouso quando a mola se

encontra relaxada. Suponha que a massa e o arito da polia sejam

desprezíveis. (a) Qual é a velocidade da caixa após percorrer 10 cm?

(b) Que distância o bloco percore do ponto em que foi liberado até o

ponto em que para momenaneamente e quais são (c) o módulo e (d)

o sentido (para cima ou para baixo ao longo do plano) da aceleração

do bloco no instante em que para momenaneamente?

Figura 8-38 Problema 27.

••28 A Fig. 8-39a se refere à mola de uma espingarda de rolha

(Fig. 8-39b); ela mosra a força da mola em função da distensão ou

compressão da mola. A mola é comprimida 5,5 cm e usada para Figura 8-41 Problema 30.

impulsionar uma rolha de 3,8 g. (a) Qual é a velocidade da rolha

se ela se separa da mola quando esa passa pela posição relaxada?

(b) Suponha que, em vez disso, a rolha permaneça ligada à mola e • •31 Um bloco de massa *m* = 2,00 kg é apoiado em uma mola em a distenda 1,5 cm antes de ocorrer a separação. Qual é, nesse caso, um plano inclinado sem arito de ângulo) = 30,0º Fig. 8-42). (O

a velocidade da rolha no momento da separação?

bloco não está preso à mola.) A mola, de consante elástica *k* = 19 ,6

N/cm, é comprimida 20 cm e depois liberada. (a) Qual é a energia

potencial elástica da mola comprimida? (b) Qual é a variação da energia potencial raviacional do sistema bloco-Terra quando o bloco se move do ponto em que foi liberado até o ponto mais alto que atinge

no plano inclinado? (c) Qual é a disância percoida pelo bloco ao

longo do plano inclinado até atingir a altura máxima?

m

(a)

Mola

Rolha

con1pritnida

Figura 8-42 Problema 31.

Figura 8-39 Problema 28.

••32 Na Fig. 8-43, uma corrente é manida sobre uma mesa sem

arito com um quarto do comprimento pendurado fora da mesa. Se

a corrente tem um comprimento *L* = 28 cm e massa *m* = 0,012 kg,

••29 Na Fig. 8-40, um bloco de massa *m* = 12 kg é liberado a qual é o trabalho necessário para puxar a parte pendurada de volta partir do repouso em um plano inclinado sem atrito de ângulo) = para cima da mesa?

30º. Abaixo do bloco há uma mola que pode ser comprimida

2,0 cm por uma força de 270 N. O bloco para momentaneamente

após comprimir a mola 5,5 cm. (a) Que distância o bloco desce ao

longo do plano da posição de repouso inicial até o ponto em que

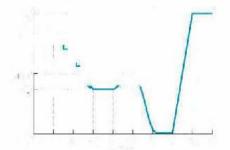
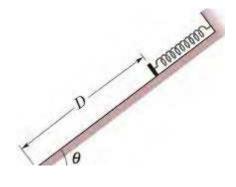
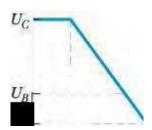
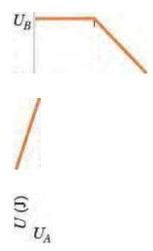
para momentaneamente? (b) Qual é a velocidade do bloco no momento em que entra em contato com a mola?

Figura 8-43 Problema 32.

• ••33 Na Fig. 8-44, uma mola com *k* = 170 N/m esá presa no alto

de um plano inclinado sem atrito de ângulo) = 37 ,Oº . A exremidade inferior do plano inclinado está a uma distância *D* = 1,00 m da extremidade da mola, a qual se encontra relaxada. Uma laa de 2,00 kg é empurrada conra a mola até a mola ser comprimida 0,200 m e

Figura 8-40 Problemas 29 e 35.

depois liberada a partir do repouso. (a) Qual é a velocidade da lata

U (J) U_B

PARTE 1

ENERGIA POTENCIAL E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

199

no instante em que a mola retona ao comprimento relaxado (que Seção 8-6 Interpretação de uma Curva de Energia é o momento em que a lata perde contato com a mola)? (b) Qual Potencial

é a velocidade da lata ao atingir a extremidade inferior do plano • •38 A Fig. 8-47 mosra um grico da energia potencial *U* em inclinado?

função da posição *x* para ua partícula de 0,20 kg que pode se

deslocar apenas ao longo de um eixo *x* sob a inluência de uma

força conservativa. Três dos valores mostrados no gico são

U =

=

=

A

9,00 J, Uc 20,00 J e U *0* 24,00 J. A partícula é liberada no ponto onde *U* forma uma "barreira de potencial" de "alura"

U *8* = 12,00 J, com uma energia cinéica de 4,0 J. Qual é a velocidade

da parícula (a) *emx* = 3,5 m e (b) em *x* = 6,5 m? Qual é a posição do ponto de retono (c) do lado direito e (d) do lado esquerdo?

U

Figura 8-44 Problema 33.

v ----

•••34 Um menino está inicialmente sentado no alto de um monte

hemisférico de gelo de raio *R* = 13 ,8 m. Ele começa a deslizar para

1

baixo com uma velocidade inicial tão pequena que pode ser despre

1

--,---

zada (Fig. 8-45). Suponha que o atrito com o gelo seja desprezível.

1

Em que altura o menino perde conato com o gelo?

.1

- - [illegible] -

o

1

2

3

4

5

6

7

8 9

***X* (1n)**

R

Figura 8-47 Problema 38.

Figua 8-45 Problema 34.

• •39 A Fig. 8-48 mosra um grico da energia potencial *U* em

função da posição *x* para uma partícula de 0,90 kg que pode se des

•••35 Na Fig. 840, um bloco de massa *m* = 3,20 kg desliza para locar apenas ao longo de um eixo *x*. Forças dissipativas não estão baixo, a partir do repouso, percorre uma distância *d* em um plano envolvidas.) Os rês valores mostrados no grico são U1 = 15,0

inclinado de ângulo } = 30,0º e se choca com uma mola de cons J, U *8* = 35,0 J e Uc = 45,0 J. A partícula é liberada em x = 4,5 m tante elástica 431 N/m. Quando o bloco para momentaneamente, a com uma velocidade inicial de 7,0 m/s, no sentido negativo de *x*.

mola ica comprimida 21,0 cm. Quais são (a) a distância *d* e (b) a (a) Se a partícula puder chegar ao ponto *x* = 1,0 m, qual será sua distância entre

o ponto do primeiro contato do bloco com a mola e velocidade nesse ponto? Se não puder, qual será o ponto de retomo?

o ponto onde a velocidade do bloco é máxima?

Quais são (b) o módulo e (c) a oientação da força experimentada

•••36 Duas meninas estão disputando um jogo no qual tentam pela partícula quando ela começa a se mover para a esquerda do acertar uma pequena caixa no chão com uma bola de gude lançada ponto *x* = 4,0 m? Suponha que a partícula seja liberada no mesmo por um canhão de mola montado em uma mesa. A caixa esá a uma ponto e com a mesma velocidade, mas o sentido da velocidade seja distância hoizontal *D* = 2,20 m da borda da mesa; veja a Fig. 8-46. o senido positivo de *x*. (d) Se a partícula puder chegar ao ponto Lia comprime a mola 1,10 cm, mas o cenro da bola de gude cai *x* = 7 ,O m, qual será sua velocidade nesse ponto? Se não puder, qual 27,0 cm antes do centro da caixa. De quanto Rosa deve comprimir será o ponto de retorno? Quais são (e) o módulo e (f) a oientação da força experimentada pela partícula quando ela começa a se mover

a mola para acertar a caixa? Suponha que o atrito da mola e da bola para a direia do ponto *x* = 5,0 m?

com o canhão seja desprezível.

Uc -------------- --

1 1 1 1

----r-- - --f

1 1

***i*--**

-D

- .*i*

2

4

6

Figura 8-46 Problema 36.

X (1n)

Figura 8-48 Problema 39.

•••37 Uma corda uniforme com 25 cm de comprimento e 15 g de

massa está presa horizontalmente em um teto. Mais arde, é pen • •40 A energia poencial de uma molécula diatômica (um sistema durada verticalmente, com apenas uma das extremidades presa no de dois átomos, como H

teto. Qual é a variação da energia potencial da corda devido a esta

2 ou 02) é dada por

mudança de posição? *(Sugestão:* considere um trecho ininitesimal

A

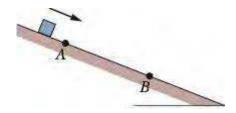
B

***U*= -**

da corda e use uma integral.)

- -

,12

,> ,

onde *r* é a distância entre os átomos da molécula e *A* e *B* são cons o disco atinge uma altura de 2, 1 m, sua velocidade é 10,5 m/s.

tantes positivas. Esta energia poencial está associada à força de li Qual é a redução da Em« do sistema disco-Terra devido ao arrasto gação entre os dois átomos. (a) Determine a *distância de equilbrio,* do ar?

ou seja, a disância entre os átomos para a qual as forças a que os •48 Na Fig. 8-49, um bloco desliza para baixo em um plano in

átomos estão submetidos é nula. A força é repulsiva ou arativa se a clinado. Enquanto se move do ponto *A* para o ponto *B,* que estão distância é (b) menor e (c) maior que a distância de equilibrio?

separados por uma distância de 5,0 m, uma força *F,* com módulo de

•••41 Uma única força conservativa *F(x)* age sobre uma parícula 2,0 N e dirigida para baixo ao longo do plano inclinado, age sobre de 1,0 kg que se move ao longo de um eixo *x.* A energia potencial o bloco. O módulo da força de atrito que age sobre o bloco é 10 N.

U(x) associada a *F(x)* é dada por

Se a energia cinética do bloco aumenta de 35 J enre *A* e *B,* qual é o trabalho realizado pela força graviacional sobre o bloco enquanto

U(x) = -4x e -' 14 J,

ele se move de *A* até *B?*

onde *x* está em metros. Em *x* = 5,0 m, a parícula possui uma energia cinética de 2,0 J. (a) Qual é a energia mecânica do sistema?

(b) Faça um gráico de *U(x)* em função de *x* para O ; *x* ; 10 m e plote, no mesmo gráfico, a reta que representa a energia mecânica

do sistema. Use o gráfico do item (b) para determinar (c) o menor

valor de *x* que a partícula pode atingir e (d) o maior valor de *x* que a partícula pode atingir. Use o ráico do item (b) para determinar Figura 8-49 Problemas 48 e 71.

(e) a energia cinéica máxima da partícula e () o valor de *x* para o

qual a energia cinética atinge este valor. (g) Escreva uma expressão

para *F(x)*, em newtons, em função de *x*, em metros. (h) *F(x)* = O •49 Um urso de 25 kg escorrega, a partir do repouso, 12 m para para que valor (inito) de *x?*

baixo em um ronco de pinheiro, movendo-se com uma velocidade de 5,6 m/s imediatamente antes de chegar ao chão. (a) Qual é a Seção 8-7 Trabalho Realizado por uma Força Extena

variação da energia potencial graviacional do sistema urso-Tera

sobre um Sistema

durante o deslizamento? (b) Qual é a energia cinética do urso imediatamente antes de chegar ao chão? (c) Qual é a força de atrito

•42 Um operário empurra um caixote de 27 kg, com velocidade média que age sobre o urso enquanto está escorregando?

constante, por 9,2 m, ao longo de um piso plano, com uma força

orientada 32º abaixo da horizontal. Se o coeiciente de arito ciné •50 _ - Um esquiador de 60 kg deixa a extremidade de uma tico entre o bloco e o piso é 0,20, quais são (a) o rabalho realizado rampa de salto de esqui

com uma velocidade de 24 m/s 25º acima pelo operário e (b) o aumento da energia térmica do sistema blo da horizonal. Suponha que, devido ao arasto do ar, o esquiador co

retone ao solo com uma velocidade de 22 m/s, aterrissando 14 m

-piso?

verticalmente abaixo da extremidade da rampa. Do início do salto

•43 Um collie arrasta a caixa de dormir em um piso, aplicando até o retorno ao solo, de quanto a energia mecânica do sistema esuma força horizonal de 8,0 N. O módulo da força de arito cinético quiador-Terra foi reduzida devido ao arrasto do ar?

que age sobre a caixa é 5,0 N. Quando a caixa é arrastada por uma

distância de 0,7 m, quais são (a) o trabalho realizado pela força do •51 Durante uma avalanche, uma pedra de 520 kg desliza a partir cão e (b) o aumento de energia térmica da caixa e do piso?

do repouso, descendo a encosta de uma montanha que tem 500 m

de comprimento e 300 m de altura. O coeficiente de atrito cinético

••44 Uma força horizonal de módulo 35,0 N empurra um bloco entre a pedra e a encosta é 0,25. (a) Se a energia potencial gravia de massa 4,00 kg em um piso no qual o coeiciente de arito ciné cional *U* do sistema rocha-Terra é nula na base da montanha, qual tico é 0,600. (a) Qual é o trabalho realizado por essa força sobre o é o valor de *U* imediatamente antes de começar a avalanche? (b) sistema bloco-piso quando o bloco sore um deslocamento de 3,00 Qual é a energia ransformada em energia térmica durante a avam? (b) Durante esse deslocamento, a energia térmica do bloco au lanche? (c) Qual é a energia cinéica da pedra ao chegar à base da menta de 40,0 J. Qual é o aumento da energia térmica do piso? (c) montanha? (d) Qual é a velocidade da pedra nesse insante?

Qual é o aumento da energia cinética do bloco?

• •52 Um biscoito de mentira, deslizando em uma superfície hori

••45 Uma corda é usada para puxar um bloco de 3,57 kg com ve zontal, está preso a uma das extremidades de uma mola horizonal locidade constante, por 4,06 m, em um piso horizonal. A força que de constante elástica *k* = 400 N/m; a outra extremidade da mola a corda exerce sobre o bloco é 7,68 N, 15,0º acima da horizontal. está ixa. O biscoito possui uma energia cinéica de 20,0 J ao passar Quais são (a) o rabalho realizado pela força da corda, (b) o aumen pela posição de equilibrio da mola. Enquanto o biscoito desliza, uma to na energia térmica do sistema bloco-piso e (c) o coeiciente de força de atrito de módulo 10,0 N age sobre ele. (a) Que distância o atrito cinético enre o bloco e o piso?

biscoito desliza a partir da posição de equilibrio antes de parar momentaneamente? (b) Qual é a energia cinética do biscoito quando Seão 8-8 Consevação da Energia

ele passa de volta pela posição de equilíbrio?

•46 Um jogador de beisebol arremessa uma bola com uma velo ••53 Na Fig. 8-50, um bloco de 3,5 kg é acelerado a partir do recidade inicial de 81,8 milh. Imediatamente antes de outro jogador pouso por uma mola comprimida de consante elástica 640 N/m. O

segurar a bola na mesma altura, sua velocidade é 11 O pés/s. De bloco deixa a mola no seu comprimento relaxado e se desloca em quanto é reduzida, em pés-libras, a energia mecânica do sistema um piso horizontal com um coeiciente de arito cinético μ

bola-Tera devido ao arrasto do ar? (A massa de uma bola de beik = 0,25.

A força de atrito para o bloco em uma distância *D* = 7,8 m. Detersebol é 9,0 onças.) mine (a) o aumento de energia térmica do sistema bloco-piso, (b)

•47 Um disco de plástico de 75 g é arremessado de um ponto 1,1 a energia cinética máxima do bloco e (c) o comprimento da mola m acima do solo, com uma velocidade escalar de 12 m/s. Quando quando esava comprimida.

D
(μ_k)

x

$\mu = 0$

h
μ_k
B
L
h
θ

do ar sobre ela é de 0,265 N durante todo o percurso. Determine (a)

a altura máxima alcançada pela pedra e (b) sua velocidade imedia

-

tamente antes de se chocar com o solo.

Se1n atito '

• •60 Um pacote de 4,0 kg começa a subir um plano inclinado de

Figura 8-50 Problema 53.

I ·

30º com uma energia cinéica de 128 J. Que distância percorre antes

de parar se o coeficiente de atrito cinético enre o pacote e o plano

• •54 Uma criança que pesa 267 N desce em um escorega de 6, 1 m é 0,30?

que faz um ângulo de 20º com a horizontal. O coeiciente de atrito ••61

.. Quando um besouro salta-m esá deitado de coscinético entre o escorega e a criança é 0,10. (a) Qual é a energia tas, pode pular encurvando bruscamente o corpo, o que converte a ransformada em energia térmica? b) Se a criança começa a descida energia armazenada em um músculo em energia mecânica, produno alto do escorrega com uma velocidade de 0,457 *mls,* qual é sua zindo um esalo audível. O videoteipe de um desses pulos mosra velocidade ao chegar ao chão?

que um besouro de massa *m* = 4,0 X 10-6 kg se desloca 0,77 mm

••55 Na Fig. 8

na verical durante um salto e consegue atingir uma altura máxima

-51, um bloco de massa *m* = 2,5 kg desliza de

enconro a uma mola de consante elástica *k* = 320 N/m. O bloco *h* = 0,30 m. Qual é o valor médio, durante o salto, (a) do módulo para após comprimir a mola 7,5 cm. O coeiciente de atrito cinéti da força externa exercida pelo piso sobre as cosas do besouro e b) co entre o bloco e o piso é 0,25. Enquanto o bloco está em contato do módulo da aceleração do besouro em unidades de *g?*

com a mola e sendo levado ao repouso, determine (a) o rabalho •••62 Na Fig. 8-53, um bloco desliza em uma pista sem arito até realizado pela mola e (b) o aumento da energia térmica do sistema chegar a um trecho de comprimento *L* = O, 75 cm, que começa a uma bloco-piso. (c) Qual é a velocidade do bloco imediatamente antes altura *h* = 2,0 m em uma rampa de ângulo e = 30º . Nesse trecho, de se chocar com a mola?

o coeficiente de atrito cinético é 0,40. O bloco passa pelo ponto *A*

com uma velocidade de 8,0 m/s. Se o bloco pode chegar ao ponto

B (onde o arito acaba), qual é sua velocidade neste ponto e, se não

pode, qual é a maior altura que atinge acima de A?

Figura 8-51 Problema 55.

o

••56 Você empurra um bloco de 2,0 kg conra uma mola horizonal, comprimindo-a 15 cm. Em seguida, solta o bloco e a mola o faz deslizar sobre uma mesa. O bloco para depois de percorrer 75 cm a

pr do ponto em que foi solto. A constante elástica da mola é 200

N/m. Qual é o coeiciente de arito cinético enre o bloco e a mesa? Figura 8-53 Problema 62.

••57 Na Fig. 8-52, um bloco desliza ao longo de uma pista, de um

nível para outro mais elevado, passando por um vale intermediário. •••63 O cabo do elevador de 180 kg da Fig. 8-54 se rompe quan

A

do o elevador esá parado no primeiro andar, onde o piso se encontra

pisa não possui atrito até o bloco atingir o nível mais alto, onde a uma distância d = 3,7 m acima de uma mola de consante elásica uma força de atrito para o bloco depois que ele percorre uma dis k = O, 15 MN/m. Um dispositivo de segurança prende o elevador aos tância d. A velocidade inicial $v0$ do bloco é 6,0 m/s, a diferença de trilhos laterais, de modo que uma força de atrito constante de 4,4 kN

altura h é 1,1 m e µ,k é 0,60. Determine o valor de d.

passa a se opor ao movimento. (a) Determine a velocidade do elevador

1•

no momento em que se choca com a mola. b) Determine a máxima

d

--

redução *x* do comprimento da mola (a força de atrito continua a agir

enquanto a mola está sendo comprimida). (c) Determine a distância

que o elevador sobe de volta no poço. (d) Usando a lei de conservação

da energia, determine a disância toal aproximada que o elevador percorre antes de parar. (Suponha que a força de arito sobre o elevador seja desprezível quando o elevador está parado.)

Figura 8-52 Problema 57.

••58 Um pote de biscoitos está subindo um plano inclinado de

40º. Em um ponto a 55 cm de distância da base do plano inclinado

(medidos ao longo do plano), o pote possui uma velocidade de 1,4

m/s. O coeiciente de arito cinético entre o pote e o plano inclinado

é 0,15. (a) Que distância o pacote ainda sobe ao longo do plano? (b)

Qual é a velocidade do bloco ao chegar novamente à base do plano

inclinado? (c) As respostas dos itens (a) e (b) aumentam, diminuem

ou permanecem as mesmas quando o coeficiente de arito cinéico Figura 8_54 Problema 63.

é reduzido (sem alterar a velocidade e a posição do pote)?

••59 Uma pedra que pesa 5,29 N é lançada verticalmente a partir •• •64 Na Fig. 8-55, um bloco é liberado a partir do repouso a do nível do solo

com uma velocidade inicial de 20,0 m/s e o arasto uma altura *d* = 40 cm, desce uma rampa sem arito e chega a um

h

d
θ

A
θ

θ

θ

primeiro trecho plano, de comprimento *d,* onde o coeiciente de 68 Um prjétil de 0,55 kg é lançado da borda de um penhasco com atrito cinético é 0,50. Se o bloco ainda está se movendo, desce uma uma energia cinética inicial de 1550 J. A maior distância vertical segunda rampa sem atrito, de altura d/2, e chega a um segundo para cima que o projétil atinge em relação ao ponto de lançamenrecho plano, onde o coeiciente de atrito cinéico também é 0,50. to é + 140 m. Qual é a componente (a) horizontal e (b) vertical da Se o bloco ainda esá se movendo, sobe uma rampa sem atrito até velocidade de lançamento? (c) No instante em que a componente parar (momentaneamente). Onde o bloco para? Se a parada final é vertical da velocidade é 65 *ls,* qual é o deslocamento verical em em um recho plano, diga em qual deles e calcule a distância *L* que relação ao ponto de lançamento?

o bloco percorre a ptir da exremidade esquerda desse platô. Se 69 Na Fig. 8-58, a polia tem massa desprezível e anto ela como o o bloco alcança a rampa, calcule a altura *H* acima do recho plano plano inclinado não possuem arito. O bloco *A* tem uma massa de mais baixo onde o bloco para momentaneamente.

1,0 kg, o bloco *B* tem uma massa de 2,0 kg e o ângulo *8* é 30º. Se

os blocos são liberados a partir do repouso com o io que os conecta

esticado, qual é a energia cinética total após o bloco *B* ter descido

25cm?

d

1

. - d 1

; .

d/2

B

Figura 8-58 Problema 69.

Figura 8-55 Problema 64.

•••65 Uma parícula pode deslizar em uma pista com extremida 70 Na Fig. 8-36, a corda tem um comprimento *L* = 120 cm e posdes elevadas e uma parte cenral plana, como mosra a Fig. 8-56. A sui uma bola presa em uma das exremidades, enquanto a oura está parte plana tem um comprimento *L* = 40 cm. Os rechos curvos da ixa. Existe um pino no ponto *P.* Liberada a partir do repouso, a bola pista não possuem atrito, mas na parte plana o coeiciente de atrito desce até a corda tocar o pino; em seguida, a bola sobe e começa cinético é μ

a girar em tomo do pino. Qual é o menor valor da distância *d* para

k = 0,20. A partícula é liberada a partir do repouso no

ponto *A*, que esá a uma altura U2. A que distância da exremidade que a bola dê uma volta completa em tono do pino? *(Sugestão:* a esquerda da parte plana a parícula inalmente para?

bola deve ainda estar se movendo no ponto mais alto da volta. Você

sabe por quê?)

A

71 Na Fig. 8-49, um bloco desce uma rampa sem atrito com uma

certa velocidade inicial. A velocidade do bloco nos pontos *A* e *B*

é 2,00 m/s e 2,60 m/s, respectivamente. Em seguida, é novamente

lançado para baixo, mas desta vez sua velocidade no ponto *A* é 4,00

-Lj

ls.* Qual é a velocidade do bloco no ponto *B?

Figura 8-56 Problema 65.

72 Dois picos nevados estão *H* = 850 m e h = 750 m acima do

vale que os separa. Uma pista de esquiação, com um comprimento

Problemas dicionais

total de 3,2 km e uma inclinação média 8 = 30º, liga os dois picos

66 Uma preguiça de 3,2 kg está pendurada em uma árvore, 3,0 (Fig. 8-59). (a) Um esquiador parte do repouso no cume do monte m acima do solo. (a) Qual é a energia potencial gravitacional do mais alto. Com que velocidade chega ao cume do monte mais baixo sistema preguiça-Terra se tomarmos o ponto de referência *y* = O se não usar os bastões para dar impulso? Ignore o arito. (b) Qual é como o nível do solo? Se a preguiça cai da árvore e o arrasto do ar o valor aproximado do coeiciente de atrito cinético enre a neve e é desprezível, quais são b) a energia cinética e (c) a velocidade da os esquis para que o esquiador pare exatamente no cume do monte preguiça no momento em que chega ao solo?

mais baixo?

67 Uma mola *(k* = 200 N/m) está presa no alto de um plano inclinado sem arito com 8 = 40º (Fig. 8 -57). Um bloco de 1,0 kg é lançado para cima ao longo do plano, de uma posição inicial que esá

l

1

a uma distância *d* = 0,60 m da exremidade da mola relaxada, com

h

H

uma energia cinética inicial de 16 J. (a) Qual é a energia cinéica do

1

l

bloco no instante em que comprime a mola 0,20 m? (b) Com que

energia cinéica o bloco deve ser lançado ao longo do plano para

que ique momenaneamente parado depois de comprimir a mola

0,40 m?

Figura 8-59 Problema 72.

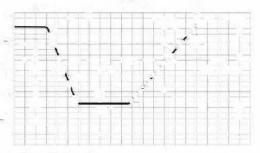
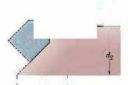
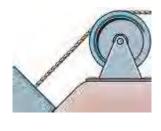
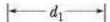
73 A temperatura de um cubo de plástico é medida enquanto o

cubo é empurrado 3,0 m em um piso, com velocidade constante,

por uma força horizontal de 15 N. As medidas revelam que a energia térmica do cubo aumentou 20 J. Qual foi o aumento da energia térmica do piso ao longo do qual o cubo deslizou?

74 Uma esquiadora que pesa 600 N passa pelo alto de um morro

Figura 8-57 Problema 67.

circular sem arito de raio *R* = 20 m (Fig. 8-60). Suponha que os

efeitos da resistência do ar sejam desprezíveis. Na subida, a esquia

x (m)

dora passa pelo ponto *B*, onde o ângulo é J = 20º, com uma velo

o

o

5

•

\

e ' 1

- 20

/

'

- --

---

t

[illegible]

**1 **

1 R

1

\

1

\ 1

Figura 8-61 Problema 77.

\ 1

\ 1

\1

de tempo, deixa de haver deslizamento entre a esteira e o caixote,

Figura 8-60 Problema 74.

que passa a se mover com a mesma velocidade que a esteira. Para o

intervalo de tempo no qual o caixote está deslizando sobre a esteira,

75 Para formar um pêndulo, uma bola de 0,092 kg é presa em uma calcule, tomando como referência um sistema de coordenadas em das exremidades de uma haste de 0,62 m de comprimento e massa repouso em relação à fábrica, (a) a energia cinética total fonecida desprezível; a oura extremidade da haste é montada em um eixo. ao caixote, (b) o módulo da força de arito cinético que age sobre o A haste é levantada até a bola icar verticalmente acima do eixo e caixote e (c) a energia total fornecida pelo motor. (d) Explique por liberada a partir do repouso. Quando a bola atinge o ponto mais que as resposas dos itens (a) e (c) são diferentes.

baixo, quais são (a) a velocidade da bola e (b) a tensão da haste?

Em seguida, a haste é colocada na horizonal e liberada a partir do

repouso. (c) Para que ângulo em relação à verical a tensão da haste

é iual ao peso da bola? (d) Se a massa da bola aumenta, a resposta

do item (c) aumenta, diminui ou permanece a mesma?

76 Uma partícula se desloca ao longo de um eixo *x*, primeiro no

sentido positivo, do ponto *x* = 1,0 m até o ponto *x* = 4,0 m, e de

Figura 8-62 Problema 78.

pois no sentido negativo, de volta ao ponto *x* = 1,0 m, enquanto

uma força extena age sobre a partícula. A força é paralela ao eixo 79 Um carro de 1500 kg começa a descer, a 30 km/h, uma ladeira *x* e pode

ter valores diferentes no caso de deslocamentos no sentido com uma inclinação de 5,0º. O motor do carro esá desligado e as positivo e no senido negativo do eixo. A tabela a se

únicas forças presentes são a força de arito exercida pela esrada

uir mostra os

valores (em newtons) em quatro situações, onde *x* está em meos: e a força ravitacional. Após o veículo ter se deslocado 50 m, a velocidade é 40 h. (a) De quanto a energia mecânica do carro

Para fora

Para dentro

foi reduzida pela força de atrito? (b) Qual é o módulo da força de

arito?

(a) +3,0

-3.0

80 Na Fig. 8-63, um bloco de granito de 1400 kg é puxado para

(b) +5,0

+5.0

cima por um cabo, em um plano inclinado, com uma velocidade

(c) +2,0x

-2.0x

consante de 1,34 m/s. As distâncias indicadas são d1 = 40 m e

(d) -1- ***3.02***

+3,0x2

d2 **= 30 m. O coeiciente de arito cinético enre o bloco e o plano inclinado é 0,40. Qual é a potência desenvolvida pela força aplicada pelo cabo?**

Determine o rabalho total realizado sobre a partícula pela força externa ***durante a viagem de ida e volta*** **nas quaro situações. (e) Em que siuações a força extena é conservativa?**

77 Uma força conservaiva ***F(x)*** **age sobre uma partícula de 2,0**

kg que se move ao longo de um eixo ***x.*** **A energia potencial** ***U(x)***

t

associada a ***F(x)*** **está plotada na Fig. 8-61. Quando a parícula se**

enconra em ***x*** **= 2,0 m, a velocidade é -1,5 m/s. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido de** ***F(x)*** **nesta posição? Entre que posições Figura 8-63 Problema 80.**

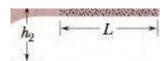
(c) à esquerda e (d) à direia a partícula se move? (e) Qual é a velocidade da partícula em ***x*** **= 7,0 m?**

81 Uma partícula pode se mover apenas ao longo de um eixo ***x,***

78 Em uma fábrica, caixotes de 300 kg são deixados cair vertical sob a ação de forças conservativas (Fig. 8-64 e tabela). A partícula mente de uma máquina de empacotamento em uma esteira transpor

é liberada em ***x*** **= 5,00 m com uma energia cinética** ***K*** **= 14,0 J e tadora que se move a 1,20 m/s (Fig. 8-62). (A velocidade da esteira uma energia**

potencial *U* = O. Se a partícula se move no senido é mantida consante por um motor.) O coeiciente de atrito cinéico negaivo do eixo *x*, qual é o valor (a) de *K* e (b) de *U* emx = 2,00

enre a esteira e cada caixote é 0,400. Após um pequeno intervalo m e o valor (c) de *K* e (d) de *U* em *x* = O? Se a partícula se move

no sentido posiivo do eixo x, qual é o valor (e) de *K* e () de *U* em 0,70. As alturas indicadas são h1 = 6,0 m e *i* = 2,0 m. Qual é a x = 11,0 m, o valor (g) de *K* e (h) de *U* emx = 12,0 m e o valor (i) velocidade do bloco (a) no ponto *B* e (b) no ponto *C?* (c) O bloco de *K* e j) de *U* em *x* = 13,0 m? (k) Plote *U(x)* em função de *x* para atinge o ponto *D?* Caso a resposta seja airmativa, determine a veloo intervalo de *x* = O a *x* = 13,0 m.

cidade do bloco nesse ponto; caso a resposta seja negativa, calcule

-

-

a distância que o bloco percorre na parte com arito.

F3

F1

atingido pela partícula? (n) O que acontece com a partícula após

. .

?

atngrr *x*

Figura 8-65 Problema 86.

***mx*.**

Intervalo

orça

87 Uma haste rígida de massa desprezível e comprimento L possui

uma bola de massa *m* presa a uma das exremidades (Fig. 8-66). A

Oa 2,00 m

i = +(3.0 N)i

-

.

oua exremidade esá presa a um eixo de al forma que a bola pode

2,00 rn :\ 3,00 111

***F*, = f (5.00 N)i**

se mover em uma circunferência vertical. Primeiro, suponha que não

3.00

existe arito no eixo. A bola é lançada para baixo a r da posição

111 a 8.00 ,n

F = O

Qual é o decréscimo de energia mecânica quando a bola sentido negaivo do eixo *x.* (a) Se a partícula pode chegar ao pon inlmente enra em repouso no ponto *B* após várias scilações?

to *x* = O m, qual é a velocidade da partícula nesse ponto; se não

pode, qual é o ponto de retono? Suponha que a partícula se move

D

no sentido positivo de x quando é liberada em x = 5,00 m com uma

velocidade de 3,45 m/s. (b) Se a parícula pode chegar ao pontox =

Eixo

13,0 m, qual é a velocidade da parícula nesse ponto; se não pode,

qual é o ponto de retono?

L

e

Hste

83 Um bloco de 15 kg sofre uma aceleração de 2,0 m/s2 em uma

superfície horizonal sem arito que faz sua velocidade aumentar de

10 m/s para 30 m/s. Qual é (a) a variação da energia mecânica do

bloco e (b) a taxa média com a qual a energia é transferida para o

B

bloco? Qual é a taxa instantânea de ransferência de energia quando

a velocidade do bloco é (c) 10 m/s e (d) 30 m/s?

Figura 8-66 Problema 87.

84 Uma certa mola *não obedece* à lei de Hooke. A força (em 88 Uma bola de aniversário cheia d'água, com uma massa de 1,50

newtons) que a mola exerce quando esá distendida de um compri kg, é lançada verticalmente para cima com uma velocidade inicial mento x (em metros) tem um módulo de 52,x + 38,4x2 e o sentido de 3,00 m/s. (a) Qual é a energia cinética da bola no momento em oposto ao da força responsável pela distensão. (a) Calcule o traba que é lançada? (b) Qual é o trabalho realizado pela força gravialho necessário para disender a mola de *x* = 0,500 m para *x* = 1,00 cional sobre a bola durante toda a subida? (c) Qual é a variação da m. (b) Com uma extremidade da mola ixa, uma parícula de massa energia potencial avitacional do sistema bola-Terra durante toda 2, 17 kg é presa à outra extremidade quando a mola está distendida a subida? (d) Se a energia potencial gravitacional é tomada como de *x* = 1,00 m. Se a parícula é liberada a partir do repouso, qual é nula no ponto de lançamento, qual é seu valor quando a bola chega a velocidade da partícula no instante em que a distensão da mola é à alura máxima? (e) Se a energia potencial gravitacional é consix = 0,500 m? (c) A força exercida pela mola é conservativa ou não derada nula na altura máxima, qual é seu valor no ponto do lançaconservativa? Justiique sua resposta.

mento? () Qual é a altura máxima?

85 A cada segundo, 1200 m3 de água passam por uma queda d'áua 89 Uma lata de refrigerante de 2,50 kg é lançada vericalmente de 100 m de altura. Três quartos da energia cinéica ganha pela áua para baixo de uma altura de 4,00 m, com uma velocidade inicial de ao cair são ansformados em energia elérica por um gerador hi 3,00 m/s. O arrasto do ar sobre a lata é desprezível. Qual é a enerdrelérico. A que taxa o gerador produz energia elétrica? (A massa gia cinética da lata (a) quando chega ao solo no inal da queda e (b) de 1 m3 de áua é 1000 kg.)

quando se encontra a meio caminho do solo? Qual é (c) a energia

86 Na Fig. 8-65, um pequeno bloco parte do ponto *A* com uma cinética da lata e (d) a energia potencial gravitacional do sistema velocidade de 7,0 m/s. O percurso é sem arito até chegar o trecho lata-Terra 0,200 s antes de a lata chegar ao solo? Tome o ponto de de comprimento *L* = 12 m, onde o coeiciente de atrito cinéico é referência *y* = O como o solo.

PARTE 1

ENERGIA POTENCIAL E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

205

90 Uma força horizonal constante faz um baú de 50 kg subir 6,0 tal. O coeiciente de arito cinéico enre o caixote e a rampa e enre o m em um plano inclinado de 30º com velocidade constante. O co caixote e o piso horizontal da ábrica é 0,28. (a) Qual é a velocidade eiciente de atrito cinético entre o baú e o plano inclinado é 0,20. do caixote ao chegar ao inal da rampa? b) Que distância adicional o Qual é (a) o trabalho realizado pela força e b) o aumento da energia caixote percorre no piso? (Supoha que a enrgia cinética do caixote térmica do baú e do plano inclinado?

não se altera com a passagem da rampa para o piso.) (c) As respostas

91 Dois blocos, de massas *M* = 2,0 kg e *2M,* estão presos a uma dos itens (a) e (b) aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas mola de constane elástica *k* = 200 N/m que tem uma das extre se a massa do caixote é reduzida à meade?

midades ixa, como mosra a Fig. 8-67. A superície horizontal e a 96 Se um jogador de beisebol de 70 kg chega a uma base depois polia não possuem arito e a polia tem massa desprezível. Os blocos de escorregar pelo chão com uma velocidade inicial de 10 /s, (a) são liberados a partir do repouso com a mola na posição relaxada. qual é o decréscimo da energia cinética do jogador e b) qual é o (a) Qual é a energia cinética total dos dois blocos após o bloco que aumento da energia térmica do corpo do jogador e do chão no qual está pendurado ter descido 0,090 m? (b) Qual é a energia cinéica escorrega?

do bloco que está pendurado depois de descer 0,090 m? (c) Qual é 97 Uma banana de 0,50 kg é arremessada vericalmente para cima a distância que o bloco pendurado percorre antes de parar momen com uma velocidade inicial de 4,00 /s e alcança uma altura mátaneamente pela primeira vez?

xima de 0,80 m. Qual é a variação da energia mecânica do sistema

banana-Terra causada pelo arrasto do ar durante a subida?

98 Uma feramenta de meal é pressionada conra uma pedra de

amolar giratória por uma força de 180 N para ser amolada. As forças

de arito enre a pedra de amolar e a ferramenta removem pequenos

fragmentos da ferramenta. A pedra de amolar tem um raio de 20,0

cm e gira a 2,50 revoluções/s. O coeiciente de atrito cinético en

2M

tre a pedra de amolar e a ferramenta é 0,320. A que taxa a energia

está sendo transferida do motor que faz a pedra girar para a energia

Figura 8-67 Problema 91.

térmica da pedra e da ferramenta e para a energia cinética dos fragmentos removidos da ferramenta?

92 Uma nuvem de cinzas vulcânicas esá se movendo horizontalmente em solo plano quando encontra uma encosta com uma incli 99 Um nadador se desloca na água a uma velocidade média de nação de 10º. A nuvem sobe 920 m antes de parar. Suponha que os 0,22 /s. A força de arrasto média é 110 N. Que potência média o gases aprisionados fazem as cinzas lutuarem, tonando assim des nadador está desenvolvendo?

prezível a força de atrito exercida pelo solo; suponha também que 100 Um automóvel com passageiros pesa 16.400 N e está se moa energia mecânica da nuvem é conservada. Qual era a velocidade vendo a 113 /h quando o motorista pisa bruscamente no freio, inicial da nuvem?

bloqueando as rodas. A força de arito exercida pela esrada sobre

93 Um escorrega de parquinho tem a forma de um arco de circun as rodas tem um módulo de 8230 N. Determine a distância que o ferência com 12 m de raio. A alura do escorrega é *h* = 4,0 m e o automóvel percore até parar.

chão é tangente à circunferência (Fig. 8-68). Uma criança de 25 kg 101 Uma bola de 0,63 kg, atirada verticalmente para cima com escorrega do alto do brinquedo, a partir do repouso, e ao chegar ao uma velocidade inicial de 14 /s, atinge uma altura máxima de 8,1

chão está com uma velocidade de 6,2 /s. (a) Qual é o comprimen m. Qual é a variação da energia mecânica do sistema bola-Terra to do escorrega? (b) Qual é a força de arito média que age sobre a durante a subida da bola até a altura máxima?

criança? Se, em vez do solo, uma reta vertical passando pelo *alto* 102 O cume do monte Everest está 8850 acima do nível do mar.

do escorrega é tangente à circunferência, qual é (c) o comprimento (a) Qual seria a energia gasta por um alpinista de 90 kg para escado escorrega e (d) a força de arito média que age sobre a criança? lar o monte Everest a partir do nível do mar, se a única força que tivesse que vencer fosse a força gravitacional? b) Quantas barras

de chocolate, a 1,25 MJ por barra, supririam essa energia? A resposta mosra que o rabalho usado para vencer a força gravitacional é uma fração muito pequena da energia necessária para escalar uma

montanha.

h

103 Um velocista que pesa 670 N corre os primeiros 7,0 m de uma

prova em 1,6 s, partindo do repouso e acelerando uniformemente .

Qual é (a) a velocidade e (b) a energia cinética do velocisa ao nal

y

. [illegible]

dos 1,6 s? (c) Qual é a potência média desenvolvida pelo velocista

.

.

!-2. [illegible] [illegible] [illegible] [illegible] .

*.:.t [illegible] ,.!:•-'1

durante o intervalo de 1,6 s?

Figura 8-68 Problema 93.

104 Um objeto de 20 kg sore a ação de uma força conservativa dada

por *F* = -3,0x - *5,0x2,* com *F* em newtons e x em metrs. Tome a 94 O ransatlânico de luxo *Queen Elizabeth 2* possui uma cenral eneria potencial assciada a essa força como nula quando o objeto elérica a diesel com uma potência máxima de 92 MW a uma ve esá em *x* = O. (a) Qual é a enrgia potencial associada à força quando locidade de cruzeiro de 32,5 nós. Que força propulsora é exercida o objeto está em *x* = 2,0 m? (b) Se o objeto pssui uma velocidade sobre o navio a esta velocidade? (1 nó = 1,852 km/h.)

de 4,0 /s no senido negaivo do eixo *x* quando esá em *x* = 5,0 m, 95 Um operário de uma ábrica deixa cair acidentalmente um cai qual é a velocidade ao passar pela origem? (c) Quais são as respostas xote de 180 kg que estava sendo mantido em repouso no alto de uma dos itens (a) e (b) se a energia potencial do sistema é tomada como rampa de 3,7 m de comprimento inclinada 39º em relação à horizon- -8,0 J quando o objeto esá emx = O?

CAPÍTULO 8

105 Uma máquina puxa 2,0 m para cima um ronco de árvore de média desenvolvida pelo carro durante o intervalo de 30 s? (c) Qual 40 kg em uma rampa de 40º com velocidade constante, com a força é a potência instantânea no im do intervalo de 30 s, supondo que a da máquina paralela à rampa. O coeiciente de atrito cinético enre aceleração é constante?

o ronco e a rampa é 0,40. Qual é (a) o trabalho realizado sobre o 115 Uma bola de neve de 1,50 kg é atirada para cima em um ângulo ronco pela força da máquina e (b) o aumento da energia térmica de 34 Oº

' com a horizontal e com uma velocidade inicial de 20,0 m/s.

do tronco e da rampa?

(a) Qual é a energia cinética inicial da bola? (b) De quanto varia a

106 A mola de uma espingarda de brinquedo tem uma constante energia potencial gravitacional do sistema bol a -Tera quando a bola elásica de 700 N/m. Para atirar uma bola, a mola é comprimida e a se move do ponto de lançamento até o ponto de alura máxima? (c) bola é introduzida no cano da espingarda. O gatilho libera a mola, Qual é a altura máxima?

que empurra a bola. A bola perde contato com a mola exatamen 116 Um paraquedisa de 68 kg cai com uma velocidade terminal te ao sair do cano. Quando a espingarda é inclinada para cima em consante de 59 m/s. (a) A que taxa a energia potencial gravitacioum ângulo de 30º com a horizontal, uma bola de 57 g atinge uma nal do sisema Terra-paraquedista está sendo reduzida? b) A que altura máxima de 1,83 m acima da ponta do cano. Suponha que o taxa a energia mecânica do sistema está sendo reduzida?

arrasto do ar sobre a bola é desprezível. (a) Com que velocidade a

mola lança a bola? b) Supondo que o atrito da bola denro do cano 1 17 Um bloco de 20 kg sobre uma superfície horizontal está preso da pistola é desprezível, determine a compressão inicial da mola.

a uma mola horizontal de constante elástica *k* = 4,0 kN/m. O bloco

é puxado para a direita até a mola icar distendida 1 O cm em relação

107 A única força que age sobre uma partícula é a foça conserva ao comprimento no estado relaxado e liberado a partir do repouso.

iva F. Se a partícula esá no ponto *A*, a energia potencial do sistema A força de atrito entre o bloco em movimento e a supeície tem um associada a F e à partícula é 40 J. Se a partícula se move do ponto *A*

para o ponto *B*, o rabalho realizado por F sobre a parícula é +25 J. módulo de 80 N. (a) Qual é a energia cinética do bloco após ter se Qual é a energia potencial do sistema com a partícula no ponto *B?*

movido 2,0 cm em elação ao ponto em que foi liberado? (b) Qual

é a energia cinética do bloco no instante em que volta pela primei108 Em 1981, Daniel Goodwin escalou 443 m *pelafachda* do ra vez ao ponto no qual a mola esá elaxada? (c) Qual é a máxima Edifício Sears, em Chicago, com o auxlio de ventosas e grampos energia cinéica atingida pelo bloco enquanto desliza do ponto em de metal. (a) Estime a massa do alpinista e calcule a energia biome que foi liberado até o ponto em que a mola está relaxada?

cânica (interna) transferida para a energia potencial ravitacional

do sistema Goodwin-Terra durante a escalada. (b) Que energia se 1 18 A resistência ao movimento de um automóvel é constituída ria preciso transferir se ele tivesse subido até a mesma alura pelo pelo arito da estrada, que é quase independente da velocidade, e o interior do prédio, usando as escadas?

arrasto do ar, que é proporcional ao quadrado da velocidade . Para

um certo carro com um peso de 12 000 N, a força de resistência total

109 Uma artista de circo de 60,0 kg escorrega 4,00 m a partir do Fé dada por *F* = 300 + l,8v2, com *F* em newtons e v em meros repouso, descendo do alto de um poste até o chão. Qual é a energia por segundo. Calcule a potência (em horsepower) necessária para cinética da arista ao chegar ao chão se a força de atrito que o poste acelerar o carro a 0,92 m/s2 quando a velocidade é 80 km/h.

exerce sobre ela (a) é desprezível (ela irá se machucar) e (b) tem

um módulo de 500 N?

1 19 Uma bola de 50 g é lançada de uma janela com uma velocidade inicial de 8,0 m/s e com um ângulo de 30º acima da horizontal.

1 1 O Um bloco de 5,0 kg é lançado para cima em um plano inclinado Usando a lei de conservação da energia, determine (a) a energia de 30º com uma velocidade de *5,0* m/s. Que distância o bloco percorre cinética da bola no ponto mais alto da rajetória e b) a velocidade (a) se o plano não possui arito e b) se o coeiciente de arito cinéico da bola quando esá 3,0 m abaixo da janela. A resposta do item b) entre o bloco e o plano é 0,40? (c) No úlimo caso, qual é o aumento depende (c) da massa da bola ou (d) do ângulo de lançamento?

da energia érmica do bloco e do plano durante a subida do blco?

(d) Se o bloco desce de volta submetido à força de arito, qual é a 120 Uma mola com uma consante elástica de 3200 N/m é distenvelocidade do bloco quando chega ao ponto de onde foi lançado?

dida até que a energia potencial elástica seja 1,44 J. *(U* = O para

a mola relaxada.) Quanto é .U se a distensão muda para (a) uma

111 Um prjétil de 9,40 kg é lançado vericalmente para cima. O distensão de 2,0 cm, b) uma compressão de 2,0 cm e (c) uma comarrasto do ar diminui a energia mecânica do sistema projétil-Terra pressão de 4,0 cm?

de 68,0 kJ durante a subida do projétil. Que altura a mais o prjétil

teria alcançado se o arrasto do ar fosse desprezível?

121 Uma locomotiva com uma potência de 1,5 MW pode acelerar um rem de uma velocidade de 10 m/s para 25 m/s em 6,0 min.

112 Um homem de 70,0 kg pula de uma janela e vai cair em uma

rede de salvamento dos bombeiros, 11,0 m abaixo da janela. Ele (a) Calcule a massa do trem. Determine, em função do tempo (em para momentaneamente, após a rede ter esticado 1,50 m. Supondo segundos), (b) a velocidade do rem e (c) a foça que acelera o rem que a energia mecânica é conservada durante o processo e que a rede durante o intervalo de 6,0 min. (d) Determine a distância percorrida se comporta como uma mola ideal, determine a energia potencial pelo trem durante este intervalo.

elásica da rede quando está esticada 1,50 m.

122 Um disco de *shuteboard* de 0,42 kg está em repouso quando

113 Uma bala de revólver de 30 g, movendo-s e com uma velocium jogador usa um taco para imprimir ao disco uma velocidade de dade horizontal de 500

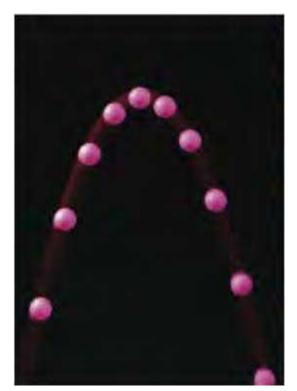
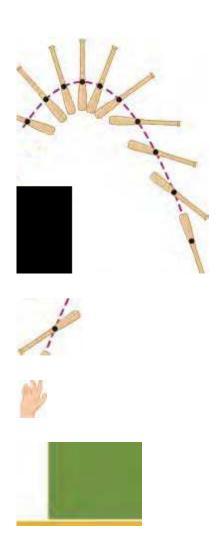
4,2 m/s com aceleração constante. A aceleração ocorre em uma disls, para depois de penetrar 12 cm em uma parede. (a) Qual é a variação da energia mecânica da bala? (b) Qual tância de 2,0 m, ao inal da qual o taco perde conato com o disco .

é a intensidade da força média execida pela parede para fazer a bala O disco desliza a uma distância adicional de 12 m antes de parar.

parar?

Suponha que a pista de *shuleboard* seja plana e que a força de atrito

sobre o disco seja constante. Qual é o aumento da energia térmica

114 Um carro de 1500 kg parte do repouso em uma estrada ho do sistema disco-pista (a) para essa distância adicional de 12 m e rizontal e adquire uma velocidade de 72 km/h em 30 s . (a) Qual é (b) para a distância total de 14 m? (c) Qual é o trabalho realizado a eneria cinéica do carro no im dos 30 s? (b) Qual é a potência pelo taco sobre o disco?

CA P Í T U LO

C E NTRO D E MASSA

E M O M E NTO LI N EAR

- O QUE É FÍSICA?

Todo engenheiro mecânico contraado como perito para reconstituir um acidente de rânsito usa a física. Todo reinador que ensina uma bailarina a saltar usa a física. Na verdade, para analisar qualquer ipo de movimento complicado é preciso

recorrer a simplificações que são possíveis apenas com um entendimento da ísica.

Neste capítulo, discutimos de que forma o movimento complicado de um sistema de

objetos, como um carro ou uma bailarina, pode ser simpliicado se determinarmos

um ponto especial do sistema: o *centro de massa.*

Eis um exemplo: quando arremessamos uma bola sem imprimir muia rotação

(Fig. 9-la), o movimento é simples. A bola descreve uma rajetória parabólica, como

discuimos no Capítulo 4, e pode ser ratada como uma parícula. Quando, por outro

lado, aremessamos um taco de beisebol Fig. 9-lb), o movimento é mais complicado.

Como cada parte do taco segue uma rajetória diferente, não é possível represenar

o taco como uma partícula. Enretanto, o taco possui um ponto especial, o cenro de

massa, que *descreve* uma trajetória parabólica simples; as ouras partes do taco se

movem em tomo do centro de massa. (Para localizar o cenro de massa, equilibre o

taco em um dedo esticado; o ponto está acima do dedo, no eixo cenral do taco.)

É difícil fazer carreira arremessando tacos de beisebol, mas muitos reinadores

ganham dinheiro ensinando atletas de salto em distância ou dançarinos a saltar da

forma correta, movendo pernas e braços ou girando o torso. O ponto de partida é

(a)

sempre o centro de massa da pessoa, porque é o ponto que se move de modo mais

simples.

9-2 O Centro de Massa

I

Definimos o centro de massa (CM) de um sistema de partículas (uma pessoa, por

exemplo) para podermos determinar com mais facilidade o movimento do sistema.

O centro de massa de um sistema de partículas é o ponto que se move como se (1)

toda a massa do sistema estivesse concenrada nesse ponto e (2) todas as forças extenas

estivessem aplicadas nesse ponto.

(b)

Nesta seção, discuimos a forma de determinar a localização do centro de massa de Figua 9-1 (a) Uma bola um sistema de parículas. Começamos com um sistema de poucas parículas e em arremessada para cima segue uma trajetória parabólica. (b) O cenro

seguida consideramos sistemas com um número muito grande de parículas (um cor de massa (ponto preto) de um taco po maciço, como um taco de beisebol). Mais adiante, discutiremos como o centro de de beisebol arremessado para cima massa de um sistema se move quando o sistema é submetido a forças extenas.

com um movimento de rotação

segue uma trajetória parabólica,

Sistemas de Patículas

mas todos os outros pontos do aco

seguem rajetórias curvas mais

A Fig. *9-a* mostra duas parículas de massas m1 e *m2* separadas por uma distância *d.* complicadas. *(a: Richard Megnl*

Escolhemos arbitrariamente como origem do eixo *x* a posição da parícula de massa *Fundamental Phoographs)*

$x_{CM} =$

$$\frac{m_2}{m_1 + m_2} d.$$

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

$x_{CM} =$

$x_{CM} =$

$$= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{n} m_i x_i.$$

m_2 x

***m*,. *Definimos* a posição do centro de massa (CM) desse sistema de duas parículas**

como

(9-1)

Suponha, por exemplo, que *i* = O. Nesse caso, existe apenas uma partícula,

de massa *m,,* e o centro de massa deve estar na posição dessa parícula; é o que realmente acontece, já que a Eq. 9-1 se reduz a *XcM* = O. *Sem,* = O, temos de novo apenas uma parícula (de massa *m2)* e, como devia ser, *XcM* = *d.* Se m1 = m2, o cenro de massa deve estar a meio caminho enre as duas partículas; a Eq. 9-1 se

reduz a Xc:I = *d/2,* como seria de se esperar. Finalmente, de acordo com a Eq. 9-1, se nenhuma das duas massas é nula, *XcM* só pode assumir valores entre O e *d,* ou seja, o cenro de massa deve estar em algum lugar entre as duas partículas.

A Fig. *9-2b* mosra uma situação mais geral na qual o sistema de coordenadas foi deslocado para a esquerda. A posição do cenro de massa é agora definida como

(9-2)

Observe que se fizermos *x,* = O, *x2* icará igual a *d* e a Eq. 9-2 se reduzirá à Eq.

9-1, como seria de se esperar. Note também que, apesar do deslocamento da origem

do sistema de coordenadas, o cenro de massa continua à mesma disância de cada

parícula.

Podemos escrever a Eq. 9-2 na forma

***m1x1* + m2x2**

'vl

'

(9-3)

onde *M* é a massa total do sistema. (No exemplo que estamos discuindo, *M* = *m,* +

m2.) Podemos estender esa equação a uma situação mais geral na qual *n* partículas

estão posicionadas ao longo do eixo *x.* Nesse caso, a massa total é *M* = *m,* + *i* +

.. . + *m.* e a posição do cenro de massa é dada por

n1

+

1x1

rn2x2 + ni3 x3 + · · · + n111 x11

M

(9-4)

onde o índice *i* assume todos os valores inteiros de 1 a *n.*

Se as partículas estão distribuídas em rês dimensões, a posição do centro de

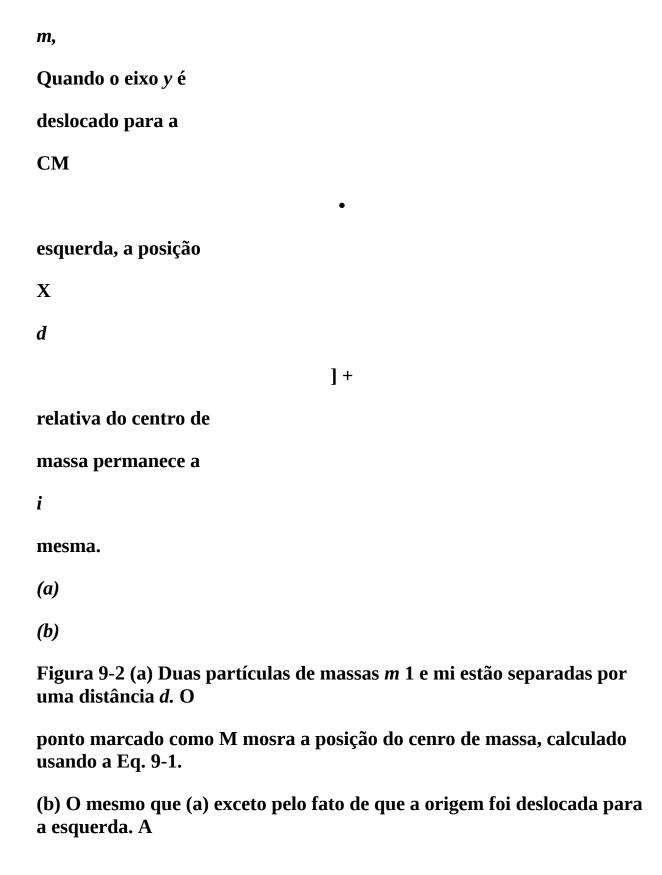
massa deve ser especificada por rês coordenadas. Por extensão da Eq. 9-4, essas

y

[illegible] - Este é o centro de massa do**

y

sistema de duas partículas.

CM

posição do centro de massa pode ser calculada usando a Eq. 9-2. A localização do centro

de massa em relação às partículas é a mesma nos dois casos.

$\vec{r}_{CM}$

PARTE 1

CENTRO DE MASSA E MOMENTO LINEAR

209

coordenadas são dadas por

1 *11*

1 *,,*

1 *11*

[illegible] = *M* L *,n,x,,* Yc." =**

L

L

M 1n1Y1,

ZcM = M n;Z;,

(9-5)

***j;* 1**

***l*= 1**

i; 1

Também podemos definir o cenro de massa usando a linguagem dos vetores.

Primeiro, lembre-se de que a posição de uma parícula de coordenadas *X;,* Y; e *Z;* é dada por um vetor posição

,

A

A

.

(9-6)

l = X *l* i + *Y*·

I]0 + *z I* k º

A A

A

onde o índice identifica a partícula e i, j e k são vetores unitários que apontam, respecivamente, no senido positivo dos eixos *x*, *y* e *z*. Analogamente, a localização do cenro de massa de um sistema de parí
culas é dada por um vetor posição:

A

A

A

'cM = XcMi + *YcMj* + ZcMk.

(9-7)

As rês equações escalares da Eq. 9-5 podem ser substituídas, portanto, por uma

única equação vetorial,

1 li

= M [illegible] 1n;1;,

(9-8)

***i*= 1**

onde M é a massa total do sistema. É possível conirmar que esa equação está correta substituindo ; e rCM por seus valores, dados pelas Eqs. 9-6 e 9-7, e separando as componentes *x, y* e *z.* O resultado são as relações escalares da Eq. 9-5.

Copos Maciços

Um objeto comum, como um bastão de beisebol, contém tantas partículas (átomos)

que podemos aproximá-lo por uma distribuição contínua de massa. As "partículas"

nesse caso se tomam elementos ininitesimais de massa *dm,* os somatórios da Eq.

9-5 se tomam integrais e as coordenadas do cenro de massa são definidas através

das equações *J*

J

XcM = _ *x* drn,

z

ll

YcM = [illegible] f *Y* d1n,

***ZcM* = :**

***dn1*,**

(9-9)

onde M agora é a massa do objeto.

Como o cálculo dessas integrais para a maioria dos objetos do mundo real (como

um televisor ou um boi, por exemplo) é muito difícil, vamos considerar neste texto

apenas objetos *homogêneos,* ou seja, objetos cuja *massa especica* (massa por unidade de volume), representada pelo símbolo *p* (lera grega rô), é a mesma para todos os elementos ininitesimais do objeto e, portanto, para o objeto como um todo. Nesse

caso, de acordo com a Eq. 1-8, podemos escrever:

dtn

M

p = dV = V'

(9-10)

onde *dV* é o volume ocupado por um elemento de massa *dm* e *V* é o volume total do objeto. Subsituindo m na Eq. 9-9 por seu valor obtido a partir da Eq. 9-1 O *[m =*

***(M/) d],* obtemos:**

J

J

J

XcM = [illegible] x áV,

YcM = [illegible] *Y dV,*

ZcM = [illegible] z *dV.*

(9-11)

O cálculo ica mais simples se o objeto possui um ponto, uma reta ou um plano de simeria, pois, nesse caso, o centro de massa está no ponto, linha ou plano de simetria. Por exemplo: o cenro de massa de uma esfera (que possui um ponto de

simetria) está no cenro da esfera (que é o ponto de simeria). O centro de massa de

um cone (cujo eixo é uma reta de simeria) está sobre esse eixo. O cenro de massa

$$\frac{m_S}{m_P} = \frac{\text{área}_S}{\text{área}_P} = \frac{\text{área}_S}{\text{área}_C - \text{área}_S}$$

$$x_P = \tfrac{1}{3}R.$$

de uma banana (que tem um plano de simeria que a divide em duas partes iguais)

está em algum ponto desse plano.

O cenro de massa de um objeto não precisa estar no interior do objeto. Não

existe massa no cenro de massa de uma rosquinha, assim como não existe fero no

cenro de massa de uma ferradura.

Exemplo

CM de uma placa vazada

-

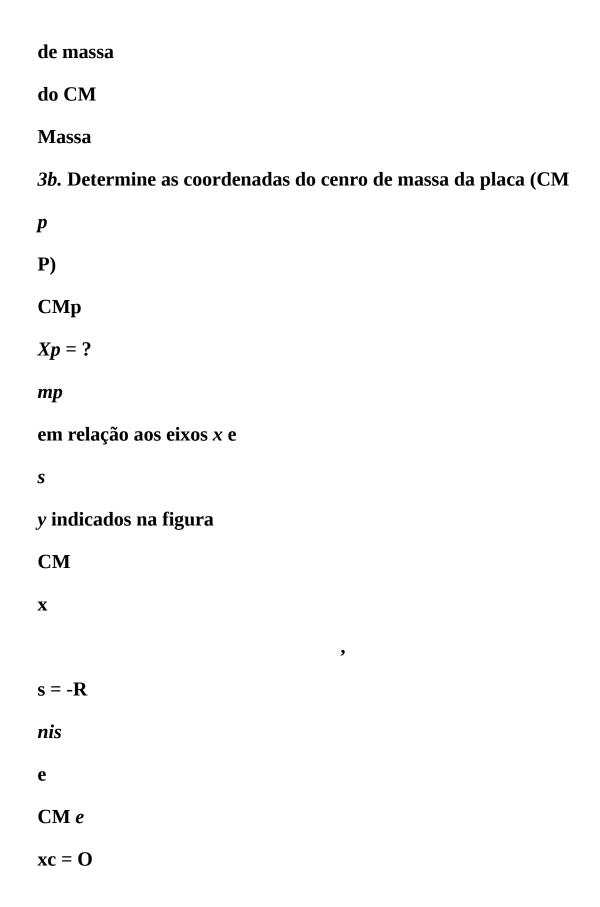
A Fig. *9-3a* mostra uma placa de metal ina e homogênea

***P,* de raio *2R,* da qual um disco de raio *R* foi removido em**

Cento

Posião

uma linha de monagem. O disco aparece na Fig. 9-

Placa

$n1c = ms + m1,$

IDEIAS-CHAVE

(1) Em primeiro lugar, vamos determinar a localização Suponha que a massa ms do disco *S* está concenrada em aproximada do centro de massa da placa *P* usando concei uma partícula em *$Xs = - R$* e que a massa *mp* está concentos de simetria. Observe que a placa é simétrica em relação rada em uma parícula em *Xp* (Fig. 9-3). Em seguida, ao eixo *x* (obtemos a parte de baixo da placa girando a par rate as duas parículas como um sistema e use a Eq. 9-2

te de cima em tono do eixo *x* e vice-versa). Isso signiica para obter o centro de massa *Xs+'* do sistema. O resultado que o cenro de massa da placa deve estar localizado nesse é o seguinte:

eixo. A placa (com o disco removido) não é simérica em

msxs + ,n,,x,,

relação ao eixo *y;* já que existe um pouco mais de massa do

Xs+P = nts + ,n,,

(9-12)

lado direito do eixo *y,* CM" deve esar um pouco à direita

do eixo *y,* como na Fig. *9-3a.* Nosso objeivo é determinar

Note que a superposição do disco *S* com a placa *P* é

a localização exata do cenro de massa.

a placa C. Assim, a posição *Xs+'* do *CMs+'* deve coinci

(2) Como a placa *P* é um corpo ridimensional, dve dir com a posição *Xc* do CMc, que está na origem: *Xs+'* =

mos, em princípio, usar as Eqs. 9-11 para calcular as coor *Xc* = O. Substituindo este resultado na Eq. 9-12 e explicidenadas *x, y* e *z* do cenro de massa. Acontece que, como tando *Xp,* obtemos a placa é fina e homogênea, estamos interessados apenas

1ns

Xp

(9-13)

nas coordenadas *x* e

= -*Xs*

***y;* se a placa tivesse uma espessura**

n11,

apreciável, poderíamos supor que o cenro de massa estava no ponto médio da espessura. Mesmo desprezando Podemos relacionar essas massas às áreas de *S* e *P*

a espessura, porém, seria diícil resolver o problema por notando que

este método, já que teríamos que escrever uma função para

massa = massa específica X volume

descrver a forma da placa com o disco removido e integrar

= massa especíica X espessura X área

essa função em duas dimensões.

Assim,

(3) Existe, porém, um meio muito mais fácil de resolm

massa específica

ver o problema Como vimos, é válido supor que a massa

s

s

=

X espessuras X áreas

de um objeto *homogêneo* está concentrada em uma partí

***m P* massa esecífica *P* espessura *P* área,,**

cula localizada no cenro de massa do objeto. Assim, po Como a placa é homogênea, as massas especicas e as demos ratar a placa e o disco como parículas, tonando espessuras são iguais e, portanto,

assim dispensável qualquer integração.

***áluos* Primeiro, colocamos o disco que foi removido**

(vamos chamá-lo de disco S) de volta no lugar (Fig. *9-3c)*,

para formar a placa original (que vamos chamar de placa

***rR*2**

1

- - - - - = -

). Devido à simetria, o cenro de massa *CMs* do disco *S*

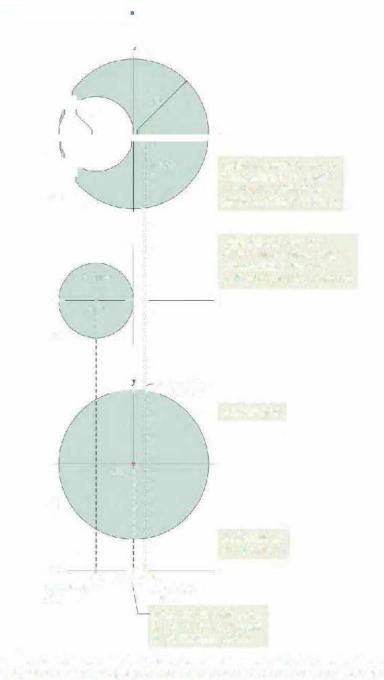
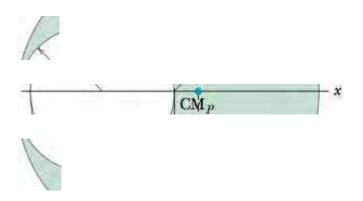
r(2R)*2 - *r R2 3

está no cenro de *S,* em x = - *R* (como mosra a figura). Da

mesma forma, o centro de massa CMc da placa composta Subsituindo este resultado e fazendo *Xs* = -*R* na Eq.

C esá no cenro de C, a origem (como mostra a igura). 9-13, obtemos:

Temos, portanto, o seguinte:

(Resposta)

três partículas.

(d) -

- -

- +--

-

-

-

- X

CMs CMc CMp

Partícula do J

L Partícula da

disco

placa

O CM da placa composta

está no mesmo lugar que

o CM das duas partes.

Figua 9-3 *(a)* A placa *P é* uma placa de metal de raio *2R,* com um furo circular de raio *R.* O centro de massa de *P* está no ponto

***CMp. (b)* O disco *S* foi colocado de volta no lugar para formar a placa composta *C.* O centro de massa *CMs* do disco S e o centro de massa CMc da placa C estão indicados. (e) O centro de massa CMs+P da combinação de S e *P* coincide com CMc, que está em *x* = O.**

***M* i=I**

M

[illegible] -**

(1,2 kg)(O) + (2,5 kg)(O) + (3,4 kg)(l20 cm)

7, l kg

= 58 cm.

(Resposta)

Fig. 9-4 Três partículas formam um triângulo equilátero de

lado *a.* A localização do centro de massa é dada pelo vetor

Na Fig. 9-4, a posição do centro de massa é dada pelo vetor

posição 'cM·

posição fcM, cujas componentes são *XcM* e *YcM·*

'

)

TESTE 1

1

2

A igura ao lado mosra uma placa quadrada uniforme, da qual quatro partes quadradas

iguais são removidas dos canto s. (a) Onde ica o cenro de massa da placa original? Onde

X

ica o centro de massa após a remoção b) da parte 1; (c) das partes 1 e 2; (d) das partes

1 e 3; (e) das partes 1, 2 e 3; (f) das quatro partes? Responda em termos dos quadrantes,

4

3

eixos ou pontos (sem realizar nenhum cálculo, é claro).

9-3 A Segunda Lei de Neton para um

Sistema de Patículas

Agora que sabemos determinar a posição do cenro de massa de um sistema de partículas, vamos discuir a relação enre forças extenas e o movimento do cenro de massa. Começamos com um exemplo simples, envolvendo duas bolas de sinuca.

Quando acertamos a bola branca em oura bola que está em repouso, esperamos

que o sistema de duas bolas continue a se mover na mesma direção após o choque.

Ficaríamos surpresos, por exemplo, se as duas bolas se movessem em nossa direção

ou se ambas se movessem para a direita ou para a esquerda.

O que coninua a se mover para a rente, sem que o movimento seja alterado pela

colisão, é o centro de massa do sistema de duas bolas. Se você concenrar a atenção

nesse ponto (que é sempre o ponto médio do segmento que une as duas bolas, pois

As forças internas da

elas têm massas iguais) poderá se convencer de que isso é verdade observando a raexplosão não mudam a jetória das bolas em uma mesa de sinuca. Não importa se o choque é rontal ou de

trajetória do CM.

raspão; o centro de massa sempre continua a se mover na direção seguida original

--

mente pela bola branca, como se não ivesse havido uma colisão. Vamos examinar

[illegible] \ \ 1/ /, .**

[illegible]

[illegible] '**

:. V-

[illegible] . -.**

mais de perto este movimento do centro de massa.

-.

Para isso, vamos subsituir o par de bolas de sinuca por um conjunto de *n* partícu

[illegible]

I' :.r **\ i [illegible]

',

1

\

las de massas (possivelmente) diferentes. Não estamos interessados nos movimentos

' \

individuais das parículas, mas *apenas* no movimento do cenro de massa do conjunto.

\ 1

Embora o cenro de massa seja apenas um ponto, ele se move como uma partícula cja

1 1

massa é igual à massa total do sistema; podemos atibuir-lhe uma posição, uma velocidade e uma aceleração. amos (e provaremos a seguir) que a equação vetorial que Figua 9-5 Um fogo de artifício descreve o movimento do cenro de massa de um sistema de parículas é

explode no ar. Se não fosse a

resistência do ar, o cenro de massa

-

dos ragmentos continuaria a seguir a

Fes = *McM* (sistema de paículas).

(9-14) ajetória parabólica original até que os

Esta equação

fragmentos começassem a atingir o solo.

é a segunda lei de Newton para o movimento do cenro de massa de

-

um sistema de partículas. Note que a forma é a mesma da equação (F., = mã) para

o movimento de uma única parícula. Contudo, as rês grandezas que aparecem na

Eq. 9-14 devem ser usadas com algum critério:

-

1. Fs é a força resultante de *todas as forças extenas* que agem sobre o sistema.

Forças de uma parte do sistema que agem sobre oura parte *forças internas)* não

dvem ser incluídas na Eq. 9-14.

2. *M* é a *massa total* do sistema. Supomos que nenhuma massa entra ou sai do sistema durante o movimento, de modo que *M* permanece constante. Nesse caso, dizemos que o sistema é fechado.

3. ãcM é a aceleração do *cento de massa* do sistema. A Eq. 9-14 não fonece nenhuma informação a respeito da aceleração de ouros pontos do

sistema.

A Eq. 9-14 é equivalente a três equações envolvendo as componentes de *Fs e*

***cM* em relação aos rês eixos de coordenadas. Essas equações são:**

F,es,x = *MacM,x* F.,,y = *MaM,y* F.,.z = *MacM,'*

(9-15)

Agora podemos voltar a examinar o comportamento das bolas de sinuca. Depois que a bola branca é posta em movimento, nenhuma força extena age sobre o sistema composto pelas duas bolas. De acordo com a Eq. 9-14, se *Fs* = O, àcM = O.

Como a aceleração é a taxa de variação da velocidade, concluímos que a velocidade do centro de massa do sistema de duas bolas não varia. Quando as duas bolas se chocam, as forças que participam do processo são forças *internas,* de uma bola sobre

a outra. Essas forças não conribuem para a força resultante Fe., que continua a ser

nula. Assim, o centro de massa do sistema, que estava se movendo para a frente antes da colisão, deve coninuar a se mover para a rente após a colisão, com a mesma velocidade e a mesma orientação.

A Eq. 9-14 se aplica não só a um sistema de partículas mas também a um corpo

sólido, como o bastão da Fig. 9-lb. Nesse caso, *M* da Eq. 9-14 é a massa do bastão e *Fs* é a força ravitacional sobre o bastão. De acordo com a Eq. 9-14, *cM = g.*

Em outras palavras, o cenro de massa do bastão se move como se o bastão fosse

uma única partícula de massa *M* sujeita à força *g.*

A Fig. 9-5 mosra ouro caso interessante. Suponha que, em um espetáculo de

fogos de arifício, um foguete seja lançado em uma rajetória parabólica. Em um

certo ponto, o foguete explode em pedaços. Se a explosão não tivesse ocorrido, o

foguete teria coninuado na rajetória parabólica mostrada na igura. As forças da

explosão são *internas* ao sistema (no início, o sistema é apenas o foguete; mais tarde, é composto pelos ragmentos do foguete), ou seja, são forças que partes do sistema

exercem sobre outras partes. A menos da resistência do ar, a força *externa* resultante *Fs* que age sobre o sistema é a força gravitacional, independentemente da explosão

$$M\vec{r}_{CM} = m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + m_3\vec{r}_3 + \cdots + m_n\vec{r}_n,$$

$$M\vec{v}_{CM} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + \cdots + m_n\vec{v}_n.$$

$$M\vec{a}_{CM} = m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2 + m_3\vec{a}_3 + \cdots + m_n\vec{a}_n.$$

$$M\vec{a}_{CM} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots + \vec{F}_n.$$

do foguete. Assim, de acordo com a Eq. 9-14, a aceleração ãcM do cenro de massa

dos fragmentos (enquanto estão voando) permanece igual a *g*. Isso significa que o

cenro de massa dos ragmentos segue a mesma rajetória parabólica que o foguete

teria seguido se não tivesse explodido.

Quando uma bailarina executa um salto conhecido como *grand jeté,* levanta os braços e estica as pernas horizontalmente assim que os pés deixam o solo (Fig. 9-6). Esses movimentos deslocam para cima o centro de massa. Embora o

cenro de massa siga ielmente uma trajetória parabólica, o movimento para cima

do cenro de massa em relação ao corpo diminui a altura alcançada pela cabeça e

pelo tronco da bailarina, que se movem aproximadamente na horizontal, criando

a ilusão de que a bailarina flutua no ar.

–

Demonstração da quação 9-14

Vamos agora demonstrar esta importante equação. De acordo com a Eq. 9-8, temos,

para um sistema de *n* partículas,

(9-16)

onde *M* é a massa total do sistema e 'cM é o vetor posição do cenro de massa do

sistema.

Derivando a Eq. 9-16 em relação ao tempo, obtemos:

(9-17)

onde v;(= *d; / dt)* é a velocidade da partícula de ordem *i* e icM (= *d'c1 / dt)* é a velocidade do cenro de massa.

Derivando a Eq. 9-17 em relação ao tempo, obtemos:

(9-18)

onde ã;(= *dv; / dt)* é a aceleração da partícula de ordem *i* e ã *01* (= di.1 / *dt)* é a aceleração do centro de massa. Embora o cenro de massa seja apenas um ponto geométrico, ele possui uma posição, uma velocidade e uma aceleração, como se fosse uma partícula.

De acordo com a segunda lei de Newton, m;ã; é igual à força resulante ; que

age sobre a partícula de ordem *i.* Assim, podemos escrver a Eq. 9-18 na forma

(9-19)

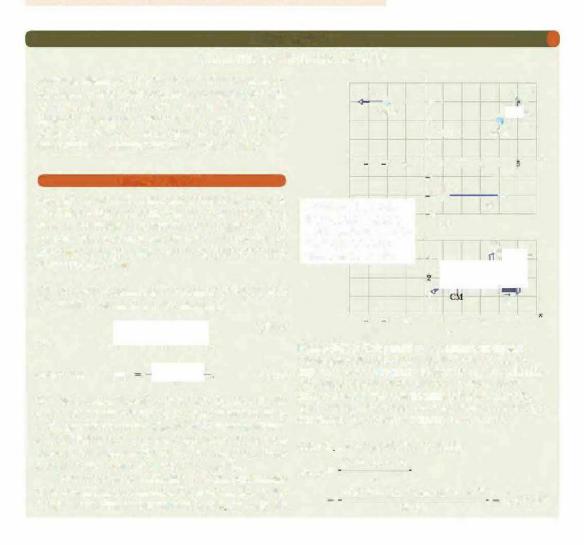
Trajetória da

cabeça

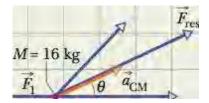
- --

[illegible] do

centro de massa

Figua 9-6 Um *grand jeté.* (Adaptado de *The Physics of Dance,* de Keneth Laws, Schirmer Books, 1984.)

$$\vec{F}_{\text{res}} = M\vec{a}_{\text{CM}}$$
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = M\vec{a}_{\text{CM}}$$

$\vec{a}_{\text{CM}}$

$$\frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3}{M}$$

Enre as forças que conribuem para o lado direito da Eq. 9-19 estão forças que as

partículas do sistema exercem umas sobre as ouras (forças intenas) e forças exercidas sobre as partículas por agentes de fora do sistema (forças extenas). De acordo com a terceira lei de Newton, as forças intenas formam pares do tipo ação-reação

que se cancelam muuamente na soma do lado direito da Eq. 9-19. O que resta é a

soma vetorial das forças *externas* que agem sobre o sistema. Assim, a Eq. 9-19 se

reduz à Eq. 9-14, como queríamos demonstrar.

TESTE 2

Dois patinadores em uma superfície de gelo sem arito seuram extremidades opostas de

uma haste de massa desprezível. E escolhido um eixo de referência na mesma posição que

a haste, com a origem no cenro de massa do sistema de dois patinadores. Um patinador,

Frederico, pesa duas vezes mais do que o ouro patinador, Eduardo. Onde os patinadores se

enconram se (a) Frederico puxa a haste para se aproximar de Eduardo, (b) Eduardo puxa

a haste para se aproximar de Frederico e (c) os dois patinadores puxam a haste?

Exemplo

Movimento do CM de três partículas

y

As rês parículas da Fig. 9-7 *a* estão inicialmente em repouso. Cada uma sore a ação de uma força *externa* produida i [illegible] ,

i

por corpos fora do sistem a das rês partículas. As orien

-'

4,Ó kg

tações das forças estão indicadas e os módulos são F1 =

l

2

3 4 5

(b)

ou

Figura 9-7 (a) Três partículas, inicialmente em repouso

nas posições indicadas, são submetidas às forças extenas

e, portanto,

(9-21) mostradas. O cenro de massa (CM) do sistema está indicado.

***(b)* As forças são ransferidas para o centro de massa do**

De acordo com a Eq. 9-20, a aeleração ãcM do cenro de sisema, que se comporta como uma partícula de massa *M*

massa tem a mesma direção que a força extena resultan iual à massa total do sistema. A força extena resultante rs e te *F*

a aceleração àcM do cenro de massa estão indicadas.

***e,* aplicada ao sistema (Fig. 9-7b). Como as partículas**

estão inicialmente em repouso, o cenro de massa ambém

deve estar em repouso. Quando o cenro de massa começa obter ãcM· Ao longo do eixo x, temos:

a acelerar, ele se move na direção de ãM e *Fe,*·

***Fix* + *Fx* + F3r**

Podemos calcular o lado direito da Eq. 9-21 usando !CM,x =

M

uma calculadora ou escrever a Eq. 9-21 em termos das

-6,0 N + (12 N) cos 45º + 14 N

componentes, calcular as componentes de ãcM e em seguida

16 kg

1,03 m/s2•

ae

} = n-l *M,y* = 27º.

(Resposta)

Assim, o módulo de ã,r é dado por

acM x

'

9-4 Momento Linear

Nesa seção, vamos concentrar nossa atenção em uma parícula isolada, com o objetivo de deinir duas grandezas imporantes. Na Seção 9-5, essas deinições serão aplicadas a sistemas com muitas parículas.

A primeira definição é a de uma palavra, *momento,* que possui váios significados

na linguagem comum, mas apenas um signiicado na física e na engenharia. O momento

linear de uma partícula é uma grandeza vetorial *p* deinida aravés da equação

p = *,n.v* (monenlu linear d: uma pa11kula),

(9-22)

onde *m* é a massa e v a velocidade da partícula. (O adjetivo *linear* é requentemente omitido, mas serve para distinguir *p* do *momento angular,* que será definido no Capítulo 11 e está associado a rotações.) Como *m* é uma grandeza escalar positiva,

a Eq. 9-22 mostra que p e v têm a mesma orientação. De acordo com a Eq. 9-22, a

unidade de momento no SI é o quilograma-mero por segundo (kg · m/s).

Newton expressou sua segunda lei originalmente em termos do momento:

A taxa de variação com o tempo do momento de uma partícula é iual à força

resultante que atua sobre a parícula e tem a mesma orienação que a força resultante.

Em forma de equação, isso signiica o seguinte:

dp

i re, -- ***dl*** **.**

(9-23)

Em palavras, a Eq. 9-23 afrrma que a força resultante Fs aplicada a uma partícula

faz variar o momento linear ***p*** **da partícula. Na vrdade, o momento linear só pode**

mudar se a partícula estiver sujeita a uma força. Se não existe nenhuma força, ***p***

não pode **mudar. Como vamos ver na Seção 9-7, este último fato pode ser uma ferramena exremamente poderosa para resolver problemas.**

Substituindo na Eq. 9-23 ***p*** **pelo seu valor, dado pela Eq. 9-22, obtemos, para**

uma massa ***m*** **constante,**

-

dp

d

–

dv

–

F,s = dt = dr (rn v) = ni dt = nia.

Assim, as relações . . = p / *dt* e *F* = mã são expressões equivalentes da segunda lei de Newton para uma partícula.

"TESTE 3

p

A figura mosra o módulo *p* do momento linear em função do tempo *t* para uma partícula que se move ao longo de um eixo. Uma força dirigida ao longo do eixo age sobre a partícula. (a) 2

Ordene as quatro regiões indicadas de acordo com o módulo da força, do maior para o menor.

(b) Em que região a velocidade da partícula está diminuindo?

$$= m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + \cdots + m_n\vec{v}_n.$$

9-5 O Momento Linear de um Sistema de Patículas

V amos estender a defmição de momento linear a um sistema de partículas. Considere

um sistema de *n* partículas, cada uma com sua massa, velocidade e momento linear.

As partículas podem interagir e sorer o efeito de forças extenas. O sistema como

um todo possui um momento linear total *P*, que é deinido como a soma vetorial dos

momentos lineares das parículas. Assim,

P = Pi + P2 + p3 + · · · + J"

(9-24)

Comparando a Eq. 9-24 com a Eq. 9-17, vemos que

- .

P = *MvM*

(momento lioear de um sisten1a de partículas).

(9-25)

que é oura forma de deinir o momento linear de um sistema de partículas:

=O momento linear de um sistema de partículas é igual ao produto da massa total do

sistema pela velocidade do cenro de massa.

Derivando a Eq. 9-25 em relação ao tempo, obtemos

dP

dVcM

.

dt = M dt = MacM·

(9-26)

Comparando as Eqs. 9-14 e 9-26, vemos que é possível escrever a segunda lei de

**Newton para um sistema de parí
culas na forma**

_,

- *dP*

***F; = dt* (sistema de parúculas),**

(9-27)

onde *Fs* é a força externa resultante que age sobre o sistema. Esa equação é a generalização para um sistema de muitas partículas da equação res = *p / dt* , válida para uma partícula isolada. Em palavras, a equação diz que a força extena *F*

s• ao

**ser aplicada a um sistema de paríc
ulas, muda o momento linear *P* do sistema. Por**

outro lado, o momento linear só pode sr mudado por uma força extena Fre,· Se não

existe uma força extena, *P não pode* mudar.

9-6 Colisão e Impulso

O momento *p* de um corpo que se comporta como uma parícula permanece consante

a menos que uma força extena aue sobre o corpo. Para mudar o momento do corpo,

podemos, por exemplo, empurrá-lo. Também podemos mudar o momento do corpo A colisão de uma bola com um taco faz de modo mais violento, fazendo-o colidir com um taco de beisebol. Em uma *colisão,* com que a bola se deforme. *(Foto de* a força exercida sobre o corpo é de curta direção, tem um módulo elevado e provoca *Harold E. Edgerton. ©The Harold and* uma mudança brusca do momento do corpo. Colisões ocorrem frequentemente na *Esther dgerton Family Trust, cortesia* vida real, mas antes de discuir situações mais complexas, vamos falar de um tipo *e Palm Press, Inc.)* simples de colisão em que um corpo que se comporta como partícula (um *projéti[)*

colide com outro objeto que se comporta como uma partícula (um *alvo).*

Colisão Simples

- *F(t)*

Suponha que o projétil seja uma bola e o alvo seja um taco. A colisão dura pouco

i-- x

,#

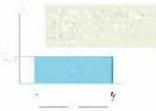
tempo, mas a força que age sobre a bola é suiciente para inverter o movimento. A

l

Bola

Fig. 9-8 mostra um instantâneo da colisão. A bola sofre a ação de uma força *F(t)* que

varia durante a colisão e muda o momento linear p da bola. A variação está relacio Figua 9-8 A força *F(t)* age sobre uma nada à força através

da segunda lei de Newton, escrita na forma $F = p / dt$. Assim, bola quando a bola e um taco colidem.

$$\vec{p}_f - \vec{p}_i = \vec{J}$$

$$J = F_{méd}\Delta t.$$

O impulso da colisão é

no intervalo de tempo *dt,* a variação do momento da bola é dada por

igual à área sob a curva.

dp = F(t) 11.

(9-28)

F

F(t)

Podemos determinar a variação total do momento da bola provocada pela colisão

interando ambos os membros da Eq. 9-28 de um instante *t;* imediaamente antes da

colisão até um instante t1imediatamente após a colisão:

dp = F(t) dt.

item *(a)* e, portanto, também é igual ao

Se a função *F(t)* é conhecida, podemos calcular J(e, portanto, a variação do

módulo do impulso *J* na colisão.

momento) integrando a função. Se temos um gráico de *F* em função do tempo *t*,

podemos obter J calculando a área enre a curva e o eixo *t*, como na Fig. *9-9a.* Em muias siuações, não sabemos como a força varia com o tempo, mas conhecemos o

módulo médio Fméd da força e a duração lt (= *t1-t)* da colisão. Nesse caso, podemos escrever o módulo do impulso como (9.35)

A Fig. *9-9b* mostra a força média em função do tempo. A área sob a curva no gráfico

é igual à área sob a curva da força real *F(t)* na Fig. *9-9a,* uma vez que as duas áreas são iguais a *J,* o módulo do impulso.

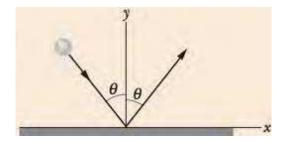
Em vez de nos preocuparmos com a bola, poderíamos ter concentrado nossa

atenção no taco na Fig. 9-8. De acordo com a terceira lei de Newton, a força experimentada pelo taco em qualquer instante tem o mesmo módulo que a força experimentada pela bola e o senido oposto. De acordo com a Eq. 9-30, isso signiica que o impulso experimentado pelo taco tem o mesmo módulo que o impulso experimentado pela bola e o sentido oposto.

TESTE 4

Um paraquedista, cujo paraquedas não abriu, cai em um monte de neve e sofre ferimentos

leves. Se caísse em um terreno sem neve, o tempo necessário para parar teria sido 1 O vezes menor e a colisão eria sido fatal. A presença da neve aumena, diminui ou mantém inalterado o valor (a) da variação do momento do paraquedista, (b) do impulso experimentado pelo paraquedista e (c) da força experimenada pelo paraquedista?

$$F_{\text{méd}} = -\frac{\Delta m}{\Delta t}$$

Colisões em Série

- *V* -,>

Vamos considerar agora a força experimentada por um corpo ao sorer uma série

lvo

x

de colisões de mesma intensidade. Imagine, por exemplo, que uma daquelas máqui

Pqjéteis

nas de arremessar bolas de tênis tenha sido ajustada para disparar bolas conra uma

parede, uma após a outra. Cada colisão produz uma força sobre a parede, mas não

é esta força que queremos calcular; o que nos interessa é a força média *F*

Figura 9-1 O Uma série de prjéteis,

md a que todos com o mesmo momento linear,

a parede é submetida durante o bombardeio, ou seja, a força média associada a um colide com um alvo ixo. A força média grande número de colisões.

F

Na Fig. 9-10, projéteis igualmente espaçados, de massas iguais *m e* momentos *11J* exercida sobre o alvo aponta para a direita e tem um módulo que depende

lineares iguais *mv,* deslocam-se ao longo de um eixo *x* e colidem com um alvo ixo. da axa com a qual os projéteis colidem Seja *n* o número de projéteis que colidem em um intervalo de tempo *Ât.* Como o com o alvo ou, altenativamente, da taxa movimento é apenas ao longo do eixo *x*, podemos usar as componentes dos momen com a qual a massa colide com o alvo.

tos ao longo desse eixo. Assim, cada projéil tem momento inicial *mv* e sore uma

variação *Âp* do momento linear por causa da colisão. A variação toal do momento

linear de *n* projéteis durante o intervalo *Ât* é *n Âp.* O impulso resultante J a que é submeido o alvo no intervalo de tempo *Ât* está orientado ao longo do eixo *x* e tem o mesmo módulo *n Âp* que a variação do momento linear e o senido contrário. Podemos escrever esta relação na forma *J* = *-n .p,*

(9-36)

onde o sinal negaivo indica que *J* e *Âp* têm sentidos opostos.

Combinando as Eqs. 9-35 e 9-36, podemos obter a força média F méd que age

sobre o alvo durante as colisões:

J

n

n

Fméd =-- = - -- *.p* = -;-- nt *.V.*

. *t*

. *t*

. *t*

(9-37)

Esta equação expressa Fméd em termos de *n/Ât,* a taxa com a qual os projéteis colidem com o alvo, e Â *v,* a variação de velocidade dos projéteis.

Se os projéteis param após o choque, a variação de velocidade é dada por

ÂV = VJ - V; = Ü - V = -v,

(9-38)

onde *V; (= v)* e *v1* (= O) são as velocidades antes e depois da colisão, respecivamente. Se, em vez disso, os projéteis ricocheteiam no alvo sem que a velocidade escalar se reduza, *v1 = -v* e, portanto,

.v = v -

r

vi = -v - v = -2v.

(9-39)

No intervalo de tempo *Ât,* uma quantidade de massa *Âm* = *nm* colide com o alvo. Sendo assim, podemos escrever a Eq. 9-37 na forma

ÂV.

(9-40)

Esta equação expressa a força média *F* méd em termos de *Âml Ât,* a taxa com a qual a massa colide com o alvo. Mais uma vez, podemos substituir Âv pelo resultado

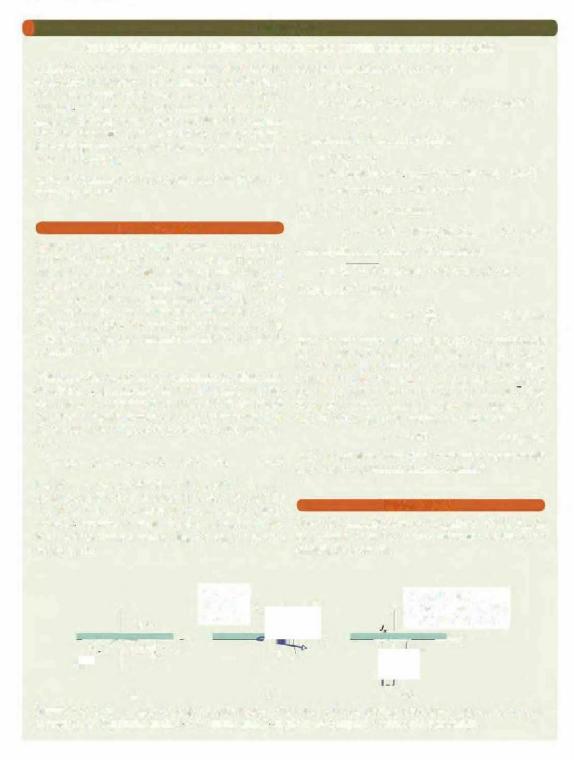
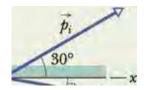
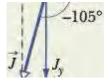
da Eq. 9-38 ou 9-39, dependendo do que acontece com os projéteis após as colisões.

TESTE 5

A igura mostra uma vista superior de uma bola ricocheteando em uma parede vertical sem que a v e locidade escalar da bola varie. Considere a variação

.p do momento linear da bola. (a) *ÂPx* é positiva,

negativa ou nula? (b) *Âpy* é positiva, negativa ou

nula? (c) Qual é a orientação de p?

xemplo

Impulso bidimensional: colisão entre um carro de corrida e um muro de proteção

A Fig. 9-1 la é uma visa superior da rajetória de um car *Componente x* Para o eixo *x,* temos: ro de corrida ao colidir com um muro de proteção. Antes

l

da colisão, o carro está se movendo com uma velocidade

x = ni(v1:r - V;.r)

escalar *V;* = 70 m/s ao longo de uma linha reta que faz um

= (80 kg)[(50 m/s) cos(- 10º) - (70 m/s) cos 30º]

ângulo de 30° com o muro. Após a colisão, está se moven

= -910 kg· m/s.

do com velocidade escalar *v1* = 50 m/s ao longo de uma

linha reta que faz um ângulo de 10º com o muro. A massa *Componente y* Para o eixo *y*, temos: *m* do piloto é 80 kg.

ly = 1n(vfy - v;i,)

(a) Qual é o impulso *J* a que o piloto é submetido no mo

= (80 kg)[(50 m/s) sen(-10º) - (70m/s)sen30º]

mento da colisão?

= -3495 kg· n1/s ' -3500 kg · m/s.

***so* O impulso é, portanto,**

I D EIAS-CHAVE

.

.

.

***J* = (-910i - 3500j) kg· m/s,**

(Resposta)

Podemos raar o piloto como uma partícula e assim aplicar o que signiica que o módulo do impulso é os princípios de ísica discuidos nesta seção. Enretanto,

não podemos calcular *J* diretamente a partir da Eq. 9-30

J = [illegible] + *1;* = 3616 kg· m/s = 3600 kg· *mls.*

porque não conhecemos a força *F(t)* que age sobre o pilo O ângulo de *J* é dado por to durante a colisão. Em ouras palavras, não dispomos de

uma função nem de um gráico que permita obter o valor

1

***8* = tan-1**

(Resposta)

de *J* por integração. Por outro lado, podemos usar a Eq.

_

J *X* '

9-32 (] = *Pr - P;)* para calcular *J* a parir da variação do que, de acordo com uma calculadora, é 75,4 °.Lembre-sede momento linear.

que o resultado fisicamente correto do arco angente pode

sr o indicado pela calculadora ou o indicado pela calcu

***álculos* A Fig. 9-1 lb mostra o momento do piloto antes ladora mais 180°. Para verificar qual dos dois é o resulta-da colisão, *P;* (que faz um ângulo de 30° com o semieixo do correto, podemos desenhar as componentes de *J* (Fig.**

x positivo), e o momento do piloto depois da colisão, p *1* 9-llc).Fazendoisso, verificamosqueOé,naverdade, 75,4° +

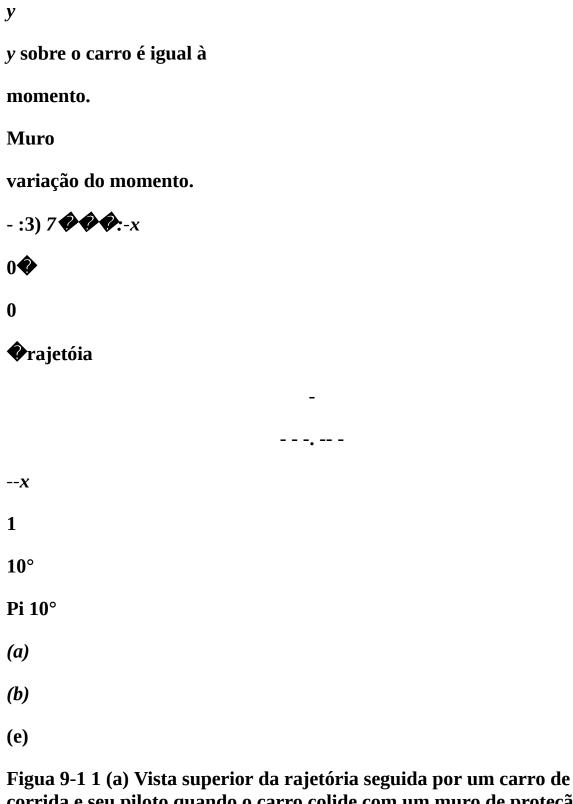
(que faz um ângulo de -10º com o semieixo x positivo). 180º = 255,4°, que também pode ser escrito como De acordo com as Eqs. 9-32 e 9-22 *(p = mv)*, podemos

escrever

***O* = -105º.**

(Resposta)

1

(b) A colisão dura 14 ms. Qual é o módulo da força média

Figua 9-1 1 (a) Vista superior da rajetória seguida por um carro de corrida e seu piloto quando o carro colide com um muro de proteção. (b) O momento inicial *p;* e o momento inal *pj* do piloto. (e) O impulso J sobre o piloto na colisão.

PARTE 1

CENTRO DE MASSA E MOMENTO LINEAR

221

***álculs* Temos:**

***Nonnas de segurança* Os engenheiros mecânicos ten**

J

3616 kg· m/s

tam reduzir os riscos dos pilotos de corida projetando

[illegible] = *.l* = 0,014 s**

muros "macios" para que as colisões durem mais tempo.

= 2,583

Se a colisão examinada neste exemplo durasse 10 vezes

X 1 (P N = 2,6 X 105 N.

(Resposta) mais tempo e todos os ouros parâmetros permanecessem

Usando a equação *F* = *ma* com *m* = 80 kg, é fácil mostrar iguais, os módulos da força média e da aceleração méque o módulo da aceleração do piloto durante a colisão é dia seriam 10 vezes menores e o piloto provavelmente 3,22 X 103 m/s2 = *329g*. Uma aceleração tão elevada seria sobreviveria.

provavelmente fatal.

9-7 Consevação do Momento Linear

Suponha que a força extena resultante *Fs* (e, portanto, o impulso J) que age sobre

um sistema de partículas é zero (ou seja, que o sistema é isolado) e que nenhuma

partícula enra ou sai do sistema (ou seja, que o sistema é fechado). Fazendo *F*

s = O

na Eq. 9-27, temos *dP* / *dt* = O e, portanto,

***P* = constante (sistea fehado e isolado).**

(9-42)

Em palavras,

Se um sistema de partículas não está submeido a uma força extena, o momento linear

total P do sistema não pode variar.

Este resultado, conhecido como lei de conservação do momento linear, também

pode ser escrito na forma

***P;* = *Pr* (sis1ema fechado e isolado).**

(9-43)

Em palavras, esta equação significa que, em um sistema fechado e isolado,

(1nomento linear total em) (momento linear total em)

um instante inicial *L;*

- um instante posterior *11* ·

***Atenção:* a conservação do momento não deve ser confundida com conservação de**

energia. Nos exemplos desta seção, o momento é conservado, mas o mesmo não

acontece com a enrgia.

Como as Eqs. 9-42 e 9-43 são equações vetoriais, cada uma equivale a três

equações para a conservação do momento linear em três direções mutuamente perpendiculares, como, por exemplo, em um sistema de coordenadas *yz.* Dependendo das forças presentes no sistema, o momento linear pode ser conservado em uma ou

duas direções, mas não em todas. Enretanto,

Se uma das componentes da força *extera* aplicada a um sistema fechado é nula, a

componente do momento linear do sistema em relação ao mesmo eixo não pode variar.

Suponha, por exemplo, que você aremesse uma laranja de uma extremidade

à oura de um aposento. Durante o percurso, a única força extena que age sobre a

laranja (que estamos considerando como o sistema) é a força ravitacional *F,* diri

R

gida vericalmente para baixo. Assim, a componente vertical do momento linear da

laranja varia, mas, já que nenhuma força extena horizontal age sobre a laranja, a

componente horizontal do momento linear não pode variar.

$P_i = Mv_i.$

Note que estamos falando das forças extenas que agem sobre um sistema fechado. Embora forças internas possam mudar o momento linear de partes do sistema, não podem mudar o momento linear total do sistema.

Os exemplos desa seção envolvem explosões unidimensionais (o que sigica

que os movimentos antes e depois da explosão ocorem ao longo de um único eixo)

ou bidimensionais (o que significa que os movimentos ocorrem em um plano que

contém dois eixos). Nas próximas seções, vamos discuir colisões unidimensionais

e bidimensionais.

TESTE 6

Um artefato inicialmente em repouso sobre um piso sem arito explode em dois pedaços,

que deslizam pelo piso após a explosão. Um dos pedaços desliza no senido posiivo de um

eixox. (a) Qual é a soma dos momentos dos dois pedaços após a explosão? (c) O segundo

pedaço pode se mover em uma direção diferente da do eixo *x?* (c) Qual é a orientação do momento do segundo pedaço?

Exemplo

xplosão unidimensional e velocidade relativa: rebocador espacial

A Fig. 9-12a mostra um rebocador espacial e uma cápsu onde os índices i e/indicam os valores antes e depois da la de carga, de massa total *M*, viajando ao longo de um ejeção, respecivamente.

eixo *x* no espaço sideral com uma velocidade inicial V; de

módulo 2100 km/h em relação ao Sol. Com uma pequena *Cculos* Como o movimento é ao longo de um único eixo, explosão, o rebocador ejeta a cápsula de carga, de mas podemos escrever os momentos e velocidades em termos sa *0,20M* Fig. 9-12b). Depois disso, o rebocador passa a das componentes *x.* Antes da ejeção, temos: viajar 500 km/h mais depressa que a cápsula ao longo do

eixo *x*, ou seja, a velocidade relaiva *v*

(945)

ei enre o cargueiro e

a cápsula é 500 km/h. Qual é, nesse instante, a velocidade Seja v cs a velocidade da cápsula ejeada em relação ao Sol. O

V

Cápsula de carga

0,20M

- - - - - - x

Mv, = 0,20M(v5 - 1·,1) + 0.80MvR *5*,

(a)

(b)

o que nos dá

Figua 9-12 *(a)* Um rebocador espacial, com uma cápsula de

vRs = *V;* + 0,20ve1,

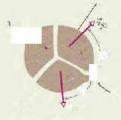
carga, movendo-s e com velocidade inicial i;. *(b)* O rebocador

ejetou a cápsula de carga; agora as velocidades em relação ao ou

***VRS* = 2 J ÜÜ k111/h + (0,20)(500 kJn/h)**

Sol são Vs para a cápsula e VRs para o rebocador.

= 2200 kn1/b.

(Respos1a)

$P_{iy} = P_{fy},$

$P_{ix} = P_{fx},$

Exemplo

xplosão bidimensional e momento: coco

**Ao explodir, uma cabeça-de-negro colocada no interior o índice *f* o valor final e o índice y a componente y de ; de um coco vazio de massa M, inicialmente em repouso [illegible]

sobre uma superície sem arito, quebra o coco em três

A componente *P;y* do momento linear inicial é zero,

pedaços, que deslizam em uma superfície horizontal. pois o coco está inicialmente em repouso. Para obter P *Y*•

Uma vista superior é mosrada na Fig. *9-13a.* O pedaço determinamos a componente y do momento linear final de C, de massa *0,30M,* tem uma

velocidade escalar final cada pedaço usando a versão para a componente y da Eq.

c = 5,0 m/s.

9-22 (pY = mvy):

(a) Qual é a velocidade do pedaço *B,* de massa *0,20M?*

***Pr1,y* = O.**

IDEIA-CHAVE

***P,v* = -0,20Mvf.y = -O.OMvfH sen 50º,**

p *r.:v*

Em primeiro lugar, precisamos saber se o momento linear

= 0.30M *v1:,* = 0.30M *v* 1 *c* sea 80º.

é conservado. Observamos que (1) o coco e seus pedaços (Note que *PJ.y* = O por causa de nossa escolha de eixos.) formam um sistema fechado, (2) as forças da explosão são A Eq. 9-48 pode ser escrita na forma intenas ao sistema e (3) nenhuma força extena age sobre

P

o sistema. Isso significa que o momento linear do sistema

,y = f'ry = *P11,>* + *P Jl,v* + *Pf.,y*·

é conservado.

Nesse caso, com c = 5,0 m/s, temos:

O = O - 0,20M1 scn 50" + (0,30M)(5.0 m/s) scn 80°,

***álculos* Para começar, inroduimos um sistema de coordenadas *y* no sistema, como mostra a Fig. 9-13b, com e, portanto, o sentido negaivo do**

eixo *x* coincidindo com o sentido

v

de *v*

r11 = 9,64 m/s " 9,6 m/s.

(Resposta)

***fA·* O eixo *x* faz 80° com a direção de *v C* e 50° com a**

direção de v *8·*

(b) Qual é a velocidade escalar do pedaço A?

O momento linear é conservado separadamente ao longo de cada eixo. Vamos usar o eixo y e escrever

***Ccuos* Como o momento linear também é conservado**

ao longo do eixo x, temos:

(9-48)

(9-49)

onde o índice i indica o valor inicial (antes da explosão), onde *P;x* = O, pois o coco está inicialmente em repouso.

Para obter Px , determinamos as componentes *x* do mo

A separação explosiva pode mudar o momento

mento linear inal de cada pedaço usando o fato de que o

de partes do sistema, mas o momento total do

pedaço *A* deve ter uma massa de *0,50M* (= *M* -0,20M -

9-8 Momento e Enegia Cinética em Colisões

Na Seção 9-6, consideramos a colisão de dois corpos que se comportavam como

parículas, mas nos concenramos em apenas um dos corpos. Nas próximas seções,

estudaremos o sistema de dois corpos como um todo, supondo que se rata de um

sistema fechado e isolado. Na Seção 9-7, discuimos uma regra para sistemas desse

tipo: o momento linear total P do sistema não pode variar, já que não há uma for

ça extena para causar essa variação. Trata-se de uma regra muito importante, pois

permite determinar o resultado de uma colisão *sem conhecer* detalhes da colisão,

como a extensão dos danos.

Também estaremos interessados na energia cinéica total de um sistema de dois

corpos que colidem. Se a energia cinética total não é alterada pela colisão, a energia

cinéica do sistema é *consevaa* (é a mesma antes e depois da colisão). Este tipo

de colisão é chamado de colisão elásica. Nas colisões entre corpos comuns, que

acontecem no dia a dia, como a colisão de dois carros ou de uma bola com um taco,

parte da energia é ransferida da energia cinética para ouras formas de energia, como

energia térmica e energia sonora. Isso signiica que a energia cinéica não é conservada. Este ipo de colisão é chamado de colisão inelásica.

Em algumas situações, podemos considerar uma colisão de corpos comuns

como *aproximaamente* elásica. Suponha que você deixa cair uma Superbola em

um piso duro. Se a colisão entre a bola e o piso (ou a Terra) fosse elásica, a bola

não perderia energia cinética na colisão e voltaria à altura inicial. Na prática, a altura

atingida pela bola após a colisão é ligeiramente menor, o que mostra que parte da

energia cinética é perdida na colisão e, portanto, a colisão é inelástica. Enretanto,

dependendo do ipo de cálculo que estamos executando, pode ser válido desprezar

a pequena quantidade de energia cinética perdida e considerar a colisão como se

fosse elástica.

A colisão inelástica de dois corpos sempre envolve uma perda de energia cinéica por parte do sistema. A maior perda ocorre quando os dois corpos permanecem juntos, caso em que a colisão é chamada de colisão pefeitamente inelástia.

A colisão de uma bola de beisebol com um taco é inelástica, enquanto a colisão de

uma bola de massa de modelar com um taco é perfeitamente inelásica, pois, nesse

caso, a bola adere ao bastão.

9-9 Colisões lnelásticas em Uma Dimensão

Colisão lnelástica Unidimensional

A Fig. 9-14 mostra dois corpos pouco antes e pouco depois de sorerem uma colisão unidimensional. As velocidades antes da colisão (índice i) e depois da colisão (índice *)* estão indicadas. Os dois corpos consituem um sistema fechado e isolado.

Podemos escrever a lei de conservação do momento linear para este sistema de dois

Representação esquemática

corpos como

de uma colisão inelástica.

Copo 1

Copo 2

-

-

, *X* nentes em relação a um único eixo. Assim, a parir da equação *p = mv,* podemos *m1*

m2

escrever a Eq. 9-50 na forma

Figua 9-14 Os corpos 1 e 2 se

m

movem ao longo de um eixo *x,* antes

i vii + m2vu = m1 Vir + m2v2r-

(9-51)

e depois de sorerem uma colisão

Se conhecemos os valores, digamos, das massas, das velocidades iniciais e de uma das

inelástica.

velocidades inais, podemos calcular a oura velocidade final usando a *Eg.* 9-51.

$$m_1 v_{1i} = (m_1 + m_2)V$$

$$V = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_{1i}.$$

$$\vec{v}_{CM} = \frac{\vec{P}}{m_1 + m_2}$$

m_2
Alvo

Colisões Pefeitamente lnelásticas Unidimensionais

A Fig. 9-15 mosra dois corpos antes e depois de sorerem uma colisão perfeiamente

inelásica (ou seja, os corpos permanecem unidos após a colisão). O corpo de massa

***i* esá inicialmente em repouso (v21 = O). Podemos nos referir a este corpo como *alvo* e ao corpo incidente como *pjétil.* Após a colisão, os dois corpos se movem juntos com velocidade *V.* Nesa situação, podemos escrever a Eq. 9-51 como**

(9-52)

ou

(9-53)

Se conhecemos os valores, digamos, das massas e da velocidade inicial vi; do projétil, podemos calcular a velocidade final *V* usando a Eq. 9-53. Note gue *V* é sempre menor que vii, já que a razão m/(m1 + aj é sempre menor que 1.

Velocidade do Centro de Massa

Em um sistema fechado e isolado, a velocidade VcM do cenro de massa do sistema

não pode variar em uma colisão porque não existem forças extenas para causar essa

variação. Para obter o valor de VcM, vamos voltar ao sistema de dois corpos e à colisão unidimensional da Fig. 9-14. De acordo com a Eq. 9-25 *(P* = vcM), podemos

relacionar iCM ao momento linear total *P* do sistema de dois corpos escrevendo

***p* = MvcM = (m1 + m2)VcM•**

(9-54)

Como o momento linear total *P* é conservado na colisão, é dado pelos dois lados da

Eq. 9-50. Vamos usar o lado esqurdo e escrever

P = *J,; + p;.*

(9-55)

Substituindo esta expressão de *P* na Eq. 9-54 e explicitando VcM, obtemos

Pu* + *P2;

tn

(9-56)

1 + m2

O lado direito desta equação é uma constante e vM tem este valor constante antes

e depois da colisão.

Assim, por exemplo, a Fig. 9-16 mosra, em uma série de instantâneos, o movimento do centro de massa para a colisão perfeiamente inelástica da Fig. 9-15. O

corpo 2 é o alvo e o momento linear inicial do corpo 2 na Eq. 9-56 é *P2i* = *i* v2; =O.

O corpo 1 é o projétil e o momento linear inicial do corpo 1 naEq. 9-56 é *Pi; = m* 1 i1•

Note que antes e depois da colisão o cenro de massa se move com velocidade constante para a direita. Depois da colisão, a velocidade inal *V* comum aos corpos é igual a vM, uma vez que a partir desse momento o cenro de massa coincide com o

conjunto formado pelos dois corpos.

Em uma colisão perfeitamente

inelástica, os corpos

permanecem unidos após a

colisão. - *Vti*

ntes

>

v2· ·= O

-

--,-- -o-· -

-x

Figua 9-15 Uma colisão perfeitamente inelástica

m1

Prqjétil

enre dois corpos. Antes da colisão, o corpo de

massa *m2* esá em repouso e o corpo de massa m1

está se movendo. Após a colisão, os corpos unidos

Depois

se movem com a mesma velocidade *V.*

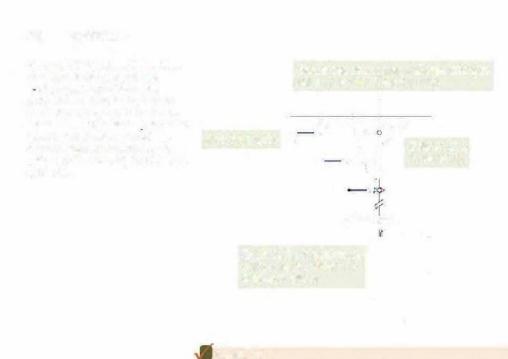
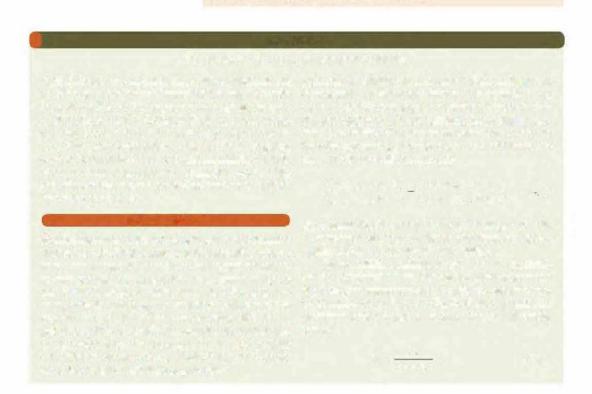



Figura 9-16 ***(a)*** **Alguns instantâneos**

Os CM dos dois corpos está entre eles e se

do sistema de dois corpos da Fig.

move com velocidade constante.

9-15, no qual ocorre uma colisão

perfeitamente inelásica. O centro de

massa do sistema é mostrado em cada

- 1 -

X

vcM

-

instanâneo. A velocidade icM do cenro

Vt i

V2;= Ü

1

Colisão! -

•,

•

O CM continua a se mover

com a mesma velocidade

depois da colisão.

TESTE 7

O corpo 1 e o corpo 2 sofrem uma colisão perfeitamente inelástica. Qual é o momento

linear final dos corpos se os momentos iniciais são, respectivamente, (a) 10 kg · /s e O;

b) 10 kg · ***ls*** **e 4 kg·** ***ls;*** **(c) 10 kg ·** ***ls*** **e -4 kg ·** ***ls?***

Exemplo

Consevação do momento: pêndulo balístico

O ***pêndulo balístico*** **era usado para medir a velocidade dos** ***Primeiro aiocínio*** **Como a colisão dura muito pouco projéteis quando não havia sensores elerônicos. A versão tempo, podemos fazer duas importantes suposições: (1) mosrada na Fig. 9-17 é composta por um grande bloco de durante a colisão, a força gravitacional e as forças das cormadeira de massa** ***M*** **= 5,4 kg pendurado em duas cordas das sobre o bloco estão em equiliôrio. Isso signiica que, compridas. Uma bala de massa** ***m*** **= 9,5 g é disparada con durante a colisão, o impulso exteno total sobre o sistema tra o bloco e fica incrustada na madeira. Com o impulso, bala-bloco é zero e, portanto, o sistema está isolado e o o pêndulo descreve um arco de circunferência, fazendo momento linear total é conservado:**

com que o centro de massa do sistema *bloco-bala* atinja

uma altura máxima *h* = 6,3 cm. Qual era a velocidade da

(mo1nento total) (1nomento total)

bala antes da colisão?

antes da colisão - depois da colisão ·

(9-57)

IDEIAS-CHAVE

(2) A colisão é unidimensional, no sentido de que a direção

,

E fácil perceber que a altura *h* atinida pelo cenro de massa do movimento da bala e do bloco *imediatamente após a* depende da velocidade *v* da bala. Enretanto, não podemos *colisão* é a mesma da bala antes da colisão.

usar a conservação da energia mecânica para relacionar

Como a colisão é unidimensional, o bloco está inicialas duas grandezas porque, certamente, alguma energia é mente em repouso e a bala fica presa no bloco, usamos a transferida de energia mecânica para ouras formas (como Eq. 9-53 para expressar a conservação do momento lineenergia térmica e a enrgia necessária para abrir caminho ar. Trocando os símbolos da Eq. 9-53 para os símbolos na madeira) quando a bala penera no bloco. Enretanto, correspondentes do problema que estamos analisando, podemos dividir este movimento complicado em duas ea temos:

pas que podem ser analisadas separadamente: (1) a colisão

entre a bala e o bloco e (2) a subida do sistema bala-bloco,

n1

***V* = - - - v.**

na qual a energia mecânica é conservada

m* + *M

(9-58)

(energia [illegible] (energia mecânica). (9_59)

uma distância h.

e1nba1xo

no alto

(Esta energia mecânica não é afetada pela força das cordas

1,

sobre o blco porque essa força é sempre perpendicular à

trajetória do bloco.) Vamos tomar a alura inicial do bloco

****

como nível de referência de energia potencial gravitacional

zero. Nesse caso, de acordo com a lei de conservação da

enegia mecânica, a enegia cinéica do sistema no início da

oscilação deve ser igual à energia potencial ravitacional no

ponto mais alto da oscilação. Como a velocidade da bala e do

bloco no início da oscilação é a velocidade *V* imediaamente

após a colisão, podemos escrever esa igualdade como

=

à(m + M)V2 (m + M)gh.

(9-60)

m

,

-.>

V

Combinando os resultados Subsituindo *V* na Eq. 9-60

pelo seu valor, dado pela Eq. 9-58, obtemos:

Figura 9-17 Um pêndulo balístico, usado para medir a

velocidade de projéteis.

,n + M *i*

v =

(9-61)

m

= (

O pêndulo balísico é uma espécie de "ransformador" que

[illegible] [illegible] kg) '(2)(9,8 n/s2)(0,063 m)

roca a ala velocidade de um objeto leve (a bala) pela ve0

locidade baixa (e, portanto, fácil de medir) de um objeto

= 630m/s.

(Resposta) pesado (o bloco).

9-1 o Colisões Elásticas em Uma Dimensão

Como comentamos na Seção 9-8, as colisões que acontecem no dia a dia
são inelásticas, mas podemos supor que algumas são aproximadamente

elásticas, ou seja, que a energia cinética total dos corpos envolvidos na colisão não é convertida em outras

formas de energia e, portanto, é conservada:

=

(energia cinética total) (energia cinética total)

(9_62)

antes da colisão

depois da colisão ·

Isso não signica que a energia dos corpos envolvidos na colisão não varia:

Representação esquemática

de uma colisão elástica com

Nas colisões elásticas, a energia cinéica dos corpos envolvidos na colisão pode variar,

um alvo estacionário.

mas a energia cinéica total do sistema permanece a mesma.

ntes

- *v1* . .

--> - *v2i=O*

Assim, por exemplo, a colisão da bola branca com uma bola colorida no jogo

m1

i

de sinuca pode ser considerada aproximadamente elásica. Se a colisão é rontal (ou

Projéil

Alvo

-

-

seja, se a bola branca incide em cheio na outra bola), a energia cinética da bola bran

Vtf

V2/

ca pode ser ransferida quase inteiramente para a outra bola. (Enretanto, o fato de Depois

>

- - - - - -J ·)-- -X

que a colisão produz ruído signiica que pelo menos uma pequena parte da energia

m,

cinéica é transferida para energia sonora.)

Figura 9-18 O corpo 1 se move ao

longo de um eixo *x* antes de sofrer uma

Alvo Etacionáio

colisão elásica com o corpo 2, que está

inicialmente em repouso. Os dois corpos

A Fig. 9-18 mostra dois corpos antes e depois de uma colisão unidimensional, como se movem ao longo do eixo *x* após a uma colisão frontal de bolas de sinuca. Um projétil de massa m1 e velocidade inicial colisão.

$$m_1 v_{1i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}^2$$

$$m_1 (v_{1i} - v_{1f}) = m_2 v_{2f}$$

$$v_{1f} \approx -v_{1i}$$

vii se move em direção a um alvo de massa m2 que esá inicialmente em repouso (v1 =

O). Vamos supor que este sistema de dois corpos é fechado e isolado. Nesse caso, o

momento linear total do sistema é conservado e, de acordo com a Eq. 9-51, temos:

(momento lin1r).

(9-63)

Se a colisão é elástica, a energia cinética toal também é conservada e podemos expressar esse fato aravés da equação (enegia cinética).

(9-64)

Nas duas equações, o índice *i* indica a velocidade inicial e o subscrito *f* a velocidade inal dos corpos. Se conhecemos as massas dos corpos e ambém conhecemos vii,

a velocidade inicial do corpo 1, as únicas grandezas desconhecidas são v,1e v *2* p as velocidades inais dos dois corpos. Com duas equações à disposição, podemos calcular o valor dessas incógnitas.

1 T $m2$

De acordo com a Eq. 9-68, v21 é sempre positiva (o alvo inicialmente parado de

massa m2 sempre se move para a rente). De acordo com a Eq. 9-67, *vi* pode ser

/

**positiva ou negativa (o projéil se move para a rente se m, > *m2* e ricocheteia se *m1* < [illegible]

Vamos examinar algumas situações especiais.

1. *Msss iguais* Se *m,* = [illegible] as Eqs. 9-67 e 9-68 se reduzem a

v1r = O* e *v2r = vii,

que poderíamos chamar de resultado da sinuca. Depois de uma colisão elástica

rontal de corpos de massas iguais, o corpo 1 (inicialmente em movimento) para

totalmente e o corpo 2 (inicialmente em repouso) entra em movimento com a

velocidade inicial do corpo 1. Em colisões elásicas ronais, corpos de massas

iguais simplesmente rocam de velocidade. Isso acontece mesmo que o corpo 2

não esteja inicialmente em repouso.

2. *Alvo pesdo* Na Fig. 9-18, um alvo pesado significa que [illegible] >> *m,*. Esse seria o caso, por exemplo, de uma bola de tênis lançada contra uma bola de boliche em

repouso. Nessa situação, as Eqs. 9-67 e 9-68 se reduzem a

= (***2nz,***

e ***Vir***

)v1;·

tn

(9-69)

2

A conclusão é que o corpo 1 (a bola de tênis) ricocheteia e refaz a rajetória no

sentido inverso, com a velocidade escalar praicamente inalterada. O corpo 2 (a

bola de boliche), inicialmente em repouso, move-se para a frente em baixa velocidade, pois o fator enre parênteses na Eq. 9-69 é muito menor do que 1. Tudo isso está denro do esperado.

*** Nesta passagem, usamos a identidade** ***a2 - b2 = (a - b)(a + b).*** **Isso facilita a solução do sistema de quações consituído elas qs. 9-65 e 9-66.**

$$v_{1f} \approx v_{1i} \quad \text{e} \quad v_{2f} \approx 2v_{1i}.$$

$$m_1v_{1i} + m_2v_{2i} = m_1v_{1f} + m_2v_{2f},$$

$$m_1(v_{1i} - v_{1f}) = -m_2(v_{2i} - v_{2f}),$$

$\vec{v}_{2i}$

3. ***Projéil pesodo*** **Este é o caso oposto, no qual** ***m, >> z.*** **Desta vez, uma bola de boliche é lançada conra uma bola de tênis em repouso. As Eqs. 9-67 e 9-68 se**

reduzem a

(9-70)

De acordo com a Eq. 9-70, o corpo 1 (a bola de boliche) simplesmente mantém a trajetória, praticamente sem ser freada pela colisão. O corpo 2 (a bola de tênis) é arremessado para a rente com o dobro da velocidade da bola de

boliche.

O leitor deve estar se perguntando: por que o dobro da velocidade? Para compreender a razão, lembre-se da colisão descria pela Eq. 9-69, na qual a velocidade do corpo leve incidente (a bola de tênis) mudou de ***+v*** **para** ***-v,*** **ou seja, a velocidade soreu uma** ***variação*** **de** ***2v.*** **A mesma variação de velocidade (agora**

de O para 2v) acontece neste exemplo.

Alvo em Movimento

Agora que examinamos a colisão elásica de um projétil com um alvo em repouso,

vamos analisar a situação na qual os dois corpos estão em movimento antes de sofrerem uma colisão elásica.

Para a situação da Fig. 9-19, a conservação do momento linear pode ser escrita

na forma

Representação esquemática

de uma colisão com um

(9-71)

alvo em movimento.

e a conservação da energia cinética na forma

v,. ' >

1

2 + 1

'

1

[illegible]

1

2

.

2m

O, o corpo 2 se tonará um alvo estacionário, como na Fig. 9-18, e as Eqs. 9-75 e 9-76 se reduzirão às Eqs.

9-67 e 9-68, respecivamente.

TESTE 8

Qual é o momento linear inal do alvo da Fig. 9-18 se o momento linear inicial do projétil

é 6 kg · mls e o momento linear inal do projétil é (a) 2 kg · mls e (b) -2 kg · /s? (c)

Qual é a energia cinética nal do alvo se as energias cinética inicial e inal do projétil é, respectivamene, *5* J e 2 J?

$v_{1f} =$

m_1 m_2

$$\vec{P}_{1i} + \vec{P}_{2i} = \vec{P}_{1f} + \vec{P}_{2f}.$$

$$K_{1i} + K_{2i} = K_{1f} + K_{2f}.$$

Exemplo

Colisão elástica de dois pêndulos

Duas esferas metálicas, inicialmente suspensas por cordas dura pouco tempo, podemos supor que o sistema de duas vericais, apenas se tocam, como mostra a Fig. 9-20. A es esferas é fechado e isolado. Isso signiica

que o momento fera 1, de massa m1 = 30 g, é puxada para a esquerda até a linear total do sistema é conservado.

altura h *1* = 8,0 cm e liberada a partir do repouso. Na parte

mais baixa da trajetória, sofre uma colisão elástica com a *Cálculo* Podemos, portanto, usar a Eq. 9-67 para calcular a esfera 2, cuja massa é m *2* = 75 g. Qual é a velocidade vi/ velocidade da esfera 1 imediaamente após a colisão: da esfera 1 imediatamente após a colisão?

m1 - m2 *v*,.

IDEIA-CHAVE

***mi + m2* '**

Podemos dividir este movimento complicado em duas

0,030 kg - 0,075 kg (l,2SZ m/s)

etapas que podem ser analisadas separadamente: (1) a

0.030 kg + 0.075 kg

descida da esfera 1 (na qual a energia mecânica é conser

= -0,537 m/s = -0,54 m/s.

(Resposta)

vada) e (2) a colisão das duas esferas (na qual o momento O sinal negaivo signiica que a esfera 1 se move para a é conservado).

esquerda imediatamente após a colisão.

1ª *etapa* Quando a esfera 1 desce, a energia mecânica do

sistema esra-Terra é conservada. (A energia mecânica

não é alterada pela foça da corda sobre a esfera 1 porque

essa força é perpendicular à rajetória da esfera.)

A bola 1 desce e colide com a

bola 2, fazendo-a subir. Se a

***culo* Vamos tomar o nível mais baixo como o nível de**

colisão é elástica, a energia

refeência de enrgia potencial gravitacional zero. Nesse

mecânica total é a mesma

antes e depois da colisão.

caso, a enrgia cinética da esfera 1 no nível mais baixo é

igual à energia potencial gravitacional do sistema quando

a esfera 1 esá na altura hi, ou seja,

1

2 _

2m. ,v1i -

h

m. ,g "

que podemos resolver para obter a velocidade vii da esfera

1 imediatamente antes da colisão:

***V11* = . = v'(2)(9.8 m/s2)(0.080 m)**

= 1,252 m/s.

a *etpa* Além de supor que a colisão é elástica, podemos

fazer outras duas suposições. Primeiro, podemos supor Figura 9-20 Duas esferas de metal suspensas por cordas que a colisão é unidimensional, já que os movimentos das apenas se tocam quando estão em repouso. A esfera 1, de esferas são aproximadamente horizontais nos momentos massa *m*,, é puxada para a esquerda até a altura h1 e depois anterior e posterior à colisão. Segundo, como a colisão liberada.

9-1 1 Colisões em Duas Dimensões

Quando uma colisão não é rontal, a direção do movimento dos corpos é diferente

antes e depois da colisão; entretanto, se o sistema é fechado e isolado, o momento

linear toal coninua a ser conservado nessas colisões bidimensionais:

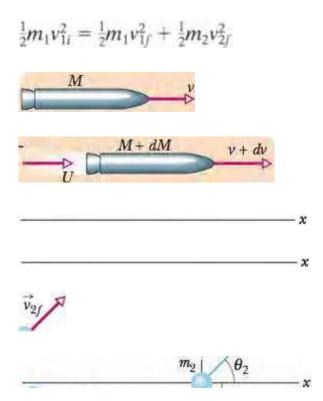
(9-77)

Se a colisão também é elástica (um caso especial), a energia cinética total também

é conservada:

(9-78)

Na maioria dos casos, o uso da Eq. 9-77 para analisar uma colisão bidimensional

é facilitado quando escrevemos a equação em termos das componentes em relação a

um sistema de coordenadas *xy.* A Fig. 9-21 mostra uma *colisão de raspão* (não ron

Nesta colisão

tal) entre um projéil e um alvo inicialmente em repouso. As rajetórias dos corpos

elástica de

após a colisão fzem ângulos 6 *1* e 0 *2* com o eixo *x*, que coincide com a direção de raspão, o movimento do projéil antes da colisão. Nessa situação, a componente da Eq. 9-77

movimento e a

As Eqs. 9-79 a 9-81 contêm sete variáveis; duas massas, *m*

raspão enre dois corpos. O corpo de

***1* e *m2;* rês velocidades,**

v

massa m *2* (o alvo) está inicialmente em

]i, vv e v *21;* dois ângulos, 61 e 0 *2*• Se conhecemos quaro dessas variáveis, podemos resolver as rês equações para obter as rês variáveis restantes.

repouso.

TESTE 9

Suponha que, na siuação da Fig. 9-21, o projétil tem um momento inicial de 6 kg · *ls,*

uma componente *x* do momento inal de 4 kg · *ls* e uma componente y do momento fal de -3 kg · *ls.* Determine (a) a componentex do momento inal do alvo e (b) a componente *y* do momento nal do alvo.

9-12 Sistemas de Massa Variável: Um Foguete

Em todos os sistemas que examinamos até agora, a massa total permanecia constante. Em certos casos, como o de um foguete, isso não é verdade. A maior parte da massa de um foguete, antes do lançamento, é consituída de combustível, que é

posteriormente queimado e ejetado pelo sistema de propulsão.

Levamos em consideração a variação de massa do foguete aplicando a segunda

lei de Nwton, não ao foguete, mas o conjunto formado pelo foguete e todos os produtos ejetados. A massa *desse* sistema *não varia* com o

tempo.

Cálculo da Aceleraão

Suponha que estamos em repouso em relação a um referencial inercial, observando

um foguete acelerar no espaço sideral sem que qualquer força gravitacional ou de

arrasto atue sobre ele. Seja *M* a massa do foguete e *v* a velocidade em um instante arbitrário *t* (veja a Fig. 9-22a).

A Fig. *9-22b* mosra a situação após um intervalo de tempo *dt.* O foguete agora está a uma velocidade *v* + *dv* e possui uma massa *M* + *dM,* onde a variação de massa *dM* tem um valor *negativo.* Os produtos de exaustão liberados pelo foguete durante o intervalo *dt* têm massa *-dM* e velocidade *U* em relação ao nosso referencial inercial.

A ejeção de massa produz

um aumento da velocidade

do foguete.

Lirnite do sistema

/

/ Limite do sistema

Figua 9-22 (a) Um foguete de massa

- *d\1*

***M* acelerando no instante *t,* do ponto de**

vista de um referencial inercial. (b) O

mesmo foguete no instante *t* + *dt.* Os

produtos de combustão ejeados durante

(a)

(b)

o intervalo *dt* são mostrados na Figura.

Nosso sistema é formado pelo foguete e os produtos de exaustão ejetados no

intervalo *dt.* Como o sistema é fechado e isolado, o momento linear toal é conservado no intervalo *dt,* ou seja*, P-* l = *P1* '

(9-82)

onde os índices *i* e/indicam os valores no início e no im do intervalo de tempo *dt.*

Podemos escrever a Eq. 9-82 na forma

Mv = -dM U + (i + d\4)(v + dv),

(9-8J)

onde o primeiro termo do lado direito é o momento linear dos produtos de exausão

ejetados durante o intervalo *dt* e o segundo termo é o momento linear do foguete no

im do intervalo *dt.*

Podemos simplificar a Eq. 9-83 usando a velocidade relativa ve, entre o foguete

e os produtos de exaustão, que está relacionada às velocidades em relação ao referencial inercial aravés da equação (velocidade do foguete em\=(velocidade do foguete)+(velocidade dos produtos em

relação ao referencial *}* em relação aos produtos

relação ao referencial *J·*

Em símbolos, isso signiica que

(v + dv) = v,el + li,

ou

***U* = V + *dv* - Irei·**

(9-84)

Subsituindo este valor de Una Eq. 9-83 e reagrupando os termos, obtemos

-dM = M dv.

(9-85)

Vrel

Dividindo ambos os membros por *dt,* obtemos

dM

dv

v,.01 = *M dr* .

dt

(9-86)

Podemos substiuir *dM/dt* (a taxa com a qual o foguete perde massa) por - *R,* onde R é a axa (positiva) de consumo de combustível e reconhecemos que *dv/dt* é a aceleração do foguete. Com essas mudanças, a Eq. 9-86 se toma Rv,c1 = Ma (primeira equaão do foguete).

(9-87)

A Eq. 9-87 vale para qualquer instante.

Note que o lado esquerdo da Eq. 9-87 tem dimensões de força (kg/s · /s =

kg · /s2 = N) e depende apenas de caracterísicas do motor do foguete, ou seja, da

taxa *R* de consumo de combustível e da velocidade v,.1 com a qual os produtos da

combustão são expelidos. O produto Rv,.1 é chamado de empuxo do motor do foguete e represenado pela letra *T.* A segunda lei de Newton se toma mais explícita quando escrevemos a Eq. 9-87 na forma *T* = *Ma,* onde *a* é a aceleração do foguete no instante em que a massa é *M.*

álculo da Velocidade

Como varia a velocidade do foguete enquanto o combusível é consumido? De acordo com a Eq. 9-85, temos: *dM*

***dv* = -v,e1 *M* .**

ntegrando ambos os membros, obtemos

." v, '

l"'' dM

***dv* = -*v,* 1 .*1, M* ,**

$$v_f - v_i = v_{rel} \ln \frac{M_i}{M_f}$$

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i,$$

onde M; é a massa inicil do foguete e M *1* é a massa final. Clculando as integrais,

obtemos

(segunda equaio do foguete)

(9-88)

para o aumento da velocidade do foguete quando a massa muda de *M;* para *Mt* (O

símbolo "ln" na Eq. 9-88 signiica *logaritmo natural.)* A *Eg.* 9-88 ilusra muito bem a vantagem dos foguetes de vários estágios, nos quais M *1* é reduzida descartando cada

estágio quando o combusível do eságio se esgota. Um foguete ideal chegaria ao

desino com apenas a carga útil.

Exemplo

Empuxo e aceleração de um foguete

Um foguete cuja massa inicial M; é 850 kg consome com onde M é a massa do foguete. À medida que o combustíbusível a uma taxa *R* = 2,3 kg/s. A velocidade *v* .1 dos gases vel é consumido, M diminui e *a* aumena. Como esamos expelidos em relação ao motor do foguete é 2800 m/s.

interessados no valor inicial de *a*, usamos o valor inicial

(a) Qual é o empuxo do motor?

da massa, *M;*.

IDEIA-CHAVE

***Cálculo* Temos:**

De acordo com a Eq. 9-87, o empuxo *T* é igual ao produ

T _ 6440 N _

2

to da taxa de consumo de combusível *R* pela velocidade

***a* = i - 850 kg - 7,6 m/s . (Resposta)**

relativa v ei dos gases expelidos.

Para ser lançado da superfície da Terra, um foguete

***culo* Temos:**

deve ter uma aceleração inicial maior que *g* = 9,8 m/s2•

Isso equivale a dizer que o empuxo *T* do motor do fo1" = Rv,ei = (2,3 kg/s)(2800 m/s) guete deve ser maior que a força ravitacional a que o

= 6440 N = 6400 N.

(Resposta) foguete está submeido no instante do lançamento, que

(b) Qual é a aceleração inicial do foguete?

neste caso é igual a M;g = (850 kg)(9,8 m/s2) = 8330 N.

Como o empuxo do nosso foguete (6400 N) não é su

IDEIA-CHAVE

ficiente, ele não poderia ser lançado da superfície da

Podemos relacionar o empuxo *T* de um foguete ao módu Tera.

lo *a* da aceleração resultante aravés da equação *T* = *Ma,*

1

REVISÃO E RESUMO

1

Centro de Massa O centro de massa de um sistema de *n* partíonde *F*

s é a resultante de todas as forças *extens* que agem sobre o

culas é defnido como o ponto cujas coordenadas são dadas por

sistema, *M* é a massa total do sistema e cM é a aceleração do cenro

1

de massa do sistema.

n

1 *i*

1 *i*

XcM = M *L* m;xi, YcM = *M L m;y;,* zcM = *M L m;z;,*

i=]

l=I

***i= 1* (9-5) Momento Linear e a Segunda Lei de Newton No caso de**

uma parícula isolada, definimos *p,* o momento linear, aravés da

ou

(9-8) equação

onde *M* é a massa toal do sistema.

p = mv,

(9-22)

Segunda Lei de Newton para um Sistema de Partíulas O em função do qual podemos escrever a segunda lei de Newton na movimento do cenro de massa de qualquer sistema de partículas é forma

govenado pela segunda lei de Newton para um sistema de par

- _ *p*

ículas, expressa pela equação

***Fe,* -**

dt

(9-23)

***Fe*, = cM •**

(9.14) Para um sistema de partículas, essas relações se tomam

lisão leva ao teorema do impulso e momento linear:

Pr

Se os dois corpos se movem juntos após a colisão, a colisão é

- *P; = .p* = 7,

(9-31, 9-32) *pefeitamente inelástica* e os corpos têm a mesma velocidade inal onde p *1* -5; = .p é a variação do momento linear do corpo e *J* é *V* já que se movem juntos).

o impulso produzido pela força *F(t)* exercida sobre o corpo pelo

outro corpo envolvido na colisão:

1

Movimento do Centro de Massa O cenro de massa de um

sistema fechado e isolado de dois corpos que colidem não é afetado

7 = ,, -t *f<(t) dr.*

pela colisão. Em paricular, a velocidade VcM do cenro de massa é

'

(9-30) a mesma antes e depois da colisão.

Se FmJ é o módulo médio de *F(t)* durane a colisão e lt é a duração

da colisão, para um movimento unidimensional, temos:

Colisões Elásticas em Uma Dimensão Uma *colisão elástica* é um ipo especial de colisão em que a energia cinética de um l = Fmédlt.

(9-35) sistema de corpos que colidem é conservada. Se o sistema é fecha

Quando uma série de projéteis de massa *m* e velocidade *v* colide do e isolado, o momento linear também é conservado. Para uma com um corpo fixo, a força média que age sobre o corpo fixo é colisão unidimensional na qual o corpo 2 é um alvo e o corpo 1 é dada por

um projétil, a conservação da energia cinética e a conservação do

momento linear levam às seguintes expressões para as velocidades

F - *ll*

n

imediaamente após a colisão:

[illegible] -**

- *lp* =

lt

,. / n 1 . *V,*

(9-37)

1n, - 1nz

onde *nl lt* é a axa com a qual os corpos colidem com o corpo ixo e

V11

(9-67)

***lv* é a variação da velocidade de cada corpo que colide. Esta força**

1111* + n1 *2

média também pode ser escrita na forma

2n1

e

1

(9-68)

.m

F. d = -

. V

. *t*

'

(940)

onde *lml lt* é a taxa com a qual a massa colide com o corpo fixo. Colisões em Duas Dimensões Se dois corpos colidem e não Nas Eqs. 9-37 e 9-40, *lv* = -*v* se os corpos param no momento estão se movendo ao longo de um único eixo (a colisão não é frondo impacto e lv = -2v se ricocheteiam sem mudança da veloci tal), a colisão é bidimensional. Se o sistema de dois corpos é fechadade escalar.

do e isolado, a lei de conservação do momento se aplica à colisão

e pode ser escrita como

Conservação do Momento Linear Se um sistema está isolado

(9-77)

de tal forma que nenhuma força resultante *externa* atua sobre o sistema, o momento linear *P* do sistema permanece constante: Na forma de componentes, a lei fonece duas equações que descrevem a colisão (uma equação para cada uma das duas dimensões).

P ; constante

(sistema Fchado e isolado).

(9-42) Se a colisão é elástica (um caso especial), a conservação da energia

Esta equação também pode ser escrita na forma

cinética na colisão fonece uma terceira equação:

(9-78)

(sistema fechado e isolado),

(9-43)

onde os índices se referem aos valores de *P* em um instante inicial e Sistemas de Massa Variável Na ausência de forças extenas, em um instante posterior . As Eqs. 9-42 e 9-43 são expressões equi a aceleração insantânea de foguete obedece à equação valentes da lei de conservação do momento linear.

Rv,d = 1/a

(primeira equação do foguete),

(9-87)

Colisões lnelásticas em Uma Dimensão Em uma *coliso* onde M é a massa instantânea do foguete (que inclui o combustível *inelástica* de dois corpos, a energia cinéica do sistema de dois cor ainda não consumido), R é a taxa de consumo de combustível e v,1

pos não é conservada. Se o sistema é fechado e isolado, o momento é a velocidade dos produtos de exaustão em relação ao foguete. O

linear total do sistema é conservado, o que podemos expressar em termo Rv,., é o empuxo do motor do foguete. Para um foguete com forma vetorial como

x
$\vec{v}_1$
$2F_0$
t
$12t_0$
$2F_0$
60° 60°
60°
60°
x
x
x

orientação da força que age sobre a

(a)

(b)

(e)

terceira partícula se o centro de mas-Figura 9-23 Pergunta 1.

Figura 9-27 Pergunta 5.

sa do sistema de rês partículas esá

(a) em repouso, (b) se movendo com velocidade constante para a

direita e (c) acelerando para a direita?

6 A Fig. 9-28 mostra quatro rupos de três ou quaro partículas

2 A Fig. 9-24 mostra uma

iuais que se movem paralelamente ou ao eixo *x* ou ao eixo *y*, com vista superior de quatro par-

y (1n)

a mesma velocidade escalar. Ordene os grupos de acordo com a

tículas de massas iguais que

velocidade escalar do cenro de massa, começando pela maior.

a

b

deslizam sobre uma superí-1-.

,--- -- --1 '

t

Figura 9-24 Perunta 2.

(a)

(b)

(a) está em repouso, (b) está

em repouso na origem e (c) passa pela origem?

3 Considere uma caixa que explode em dois pedaços enquanto se

y

move com velocidade constante positiva ao longo de um eixo *x*. Se

I •

l

um dos pedaços, de massa m1, possui uma velocidade positiva i1,

o outro pedaço, de massa 2, pode ter (a) uma velocidade positiva

i2 (Fig. 9 -25a), (b) uma velocidade negativa i2 (Fig. 9-25b) ou (c)

velocidade zero (Fig. 9-25c). Ordene esses rês resultados possíveis

para o se

l

undo pedaço de acordo com o módulo de i1 correspondente, começando pelo maior.

- - -

-

(e)

(d)

Figura 9-28 Pergunta 6.

I EI E f 11 E

7 Um bloco desliza ao longo de um piso sem atrito em direção a

um segundo bloco que esá inicialmente em repouso e tem a mesma

(a)

(b)

(e)

massa. A Fig. 9-29 mosra quatro possibilidades para um gráico das

Figura 9-25 Pergunta 3.

energias cinéticas *K* dos blocos antes e depois da colisão. (a) Indique

quais são as possibilidades que representam situações isicamente

impossíveis. Das outras possibilidades, qual é a que representa (b)

4 A Fig. 9-26 mostra ráficos do módulo da força que age sobre uma
colisão elástica e (c) uma colisão inelástica?

um corpo envolvido em uma colisão em função do tempo. Ordene

os gráicos de acordo com o módulo do impulso exercido sobre o

K

K

corpo, começando pelo maior.

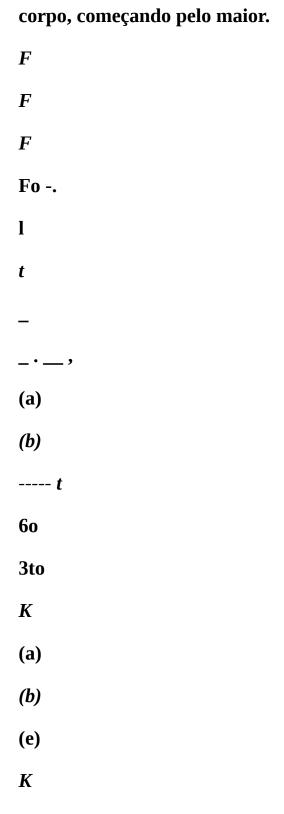



Figura 9-26 Pergunta 4.

5 Os diagramas de corpo livre na Fig. 9-27 são vistas superiores

[illegible] *t*-+- [illegible]

de forças horizontais agindo sobre três caixas de chocolate que se

1

t

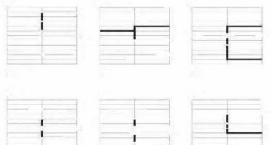
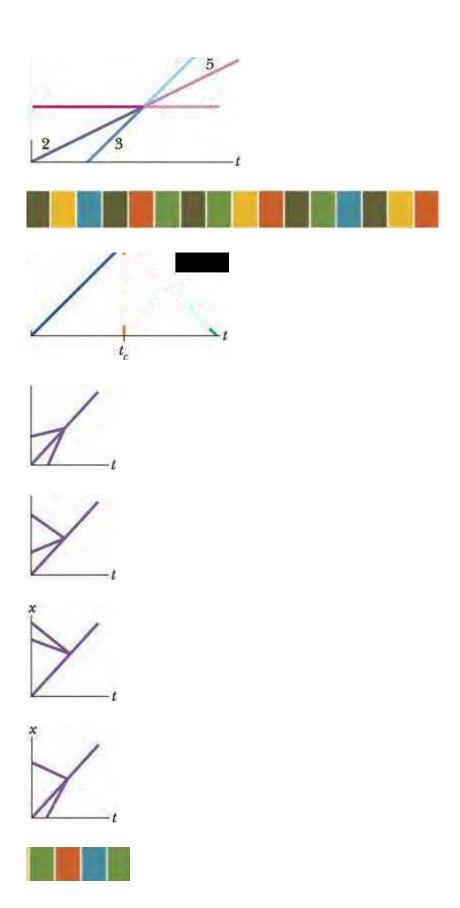
movem em um balcão sem arito. Para cada caixa, determine se as

(e)

(d)

componentes *x* e *y* do momento linear são conservadas.

Figura 9-29 Pergunta 7.

5
2
3
t
t
t_c
t
t
x
t
x
t

8 A Fig. 9-30 mosra um insta n

A B C

11 O bloco 1, de massa m1, desliza ao longo de um eixo *x* em um

tâneo do bloco 1 enquanto desliza

• • •

2

piso sem arito e sofre uma colisão elástica com um bloco 2 de masao longo de um eixo *x* em um piso sa *m2* inicialmente em repouso. A Fig. 9-33 mosra um gráico da

sem atrito, antes de sofrer uma coli Figura 9-30 Pergunta 8.

posição *x* do bloco 1 em função do tempo *t* até a colisão ocorrer na são elásica com um bloco 2 inicial-posição *xc* e no instante *t*,. Em qual das regiões identificadas com mente em repouso. A figura também mosra rês posições possíveis letras continua o ráico (após a colisão) se (a) m1 < *i*, (b) m1 > para o centro de massa (CM) do sistema dos dois blocos no mesmo *m2?* (c) Ao longo de qual das retas identiicadas com números coninstante. (O ponto *B* está equidisante dos cenros dos dois blocos.) tinua o gráico se m1 = *m2*?

Após a colisão, o bloco 1 permanece em repouso, continua a se

mover no mesmo sentido ou passa a se mover no senido oposto se

X

' *e*

1

'

sa em função do tempo . (a) Os dois

1 *D* ' ,4

corpos esavam se movendo antes da

15

'

colisão ou um deles esava em repou-Figua 9-31 Pergunta 9.

so? Que reta corresponde ao movi-

mento do centro de massa (b) antes da colisão e (c) depois da co Figura 9-33 Pergunta 1 1 .

lisão? (d) A massa do corpo que estava se movendo mais depressa

antes da colisão é maior, menor ou igual à do ouro corpo?

12 A Fig. 9-34 mostra quaro gricos da posição em função do

10 Um bloco sobre um piso horizontal está inicialmente em r e tempo para dois corpos e seu centro de massa. Os dois corpos for pouso, em movimento no sentido positivo de um eixo *x* ou em mo mam um sistema fechado e isolado e sofrem uma colisão unidimenvimento no senido negaivo do mesmo eixo. O bloco explode em sional perfeitamente inelásica, ao longo de um eixo *x*. No gráico dois pedaços que continuam a se mover ao longo do eixo *x*. Supo 1, (a) os dois corpos estão se movendo no sentido positivo ou no nha que o bloco e os dois pedaços formem um sistema fechado e sentido negaivo do eixo *x?* (b) E o centro de massa? (c) Quais são isolado. A Fig. 9-32 mosra seis possibilidades

- -

-

P R O B L E M A S

1

• -- O número de pontos indica o grau de diiculdade do probl ema

Informações adici onais disponíveis em O *Circo Voador da Ffsica* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Sção 9-2 O Centro de Massa

que o centro de massa do sistema de rês partículas tenha coord e

•1 Uma partícula de 2,00 kg tem coordenadas *y* (-1,20 m, 0,500 nadas (-0,500 m, -0,700 m)?

m) e uma partícula de 4,0 kg tem coordenadas *xy* (0,600 m, -0,750 •2 A Fig. 9-35 mostra um sistema de três partículas de massas m). Ambas estão em um plano horizontal. Em que coordenada (a) *x* m1 = 3,0 kg, *m2* = 4,0 kg e 3 = 8,0 kg. As escalas do grico são e (b) *y* deve ser posicionada uma terceira partícula de 3 ,00 kg para deinidas por *x,* = 2,0 m e *y,* = 2,0 m. Quais são (a) a coordenada

$2d_1$
d_3
x
d_1
d_1
y

N

H
H
H
x
d

PARTE 1

CENTRO DE MASSA E MOMENTO LINEAR

x e (b) a coordenada *y* do cenro de massa do sistema? (c) Se m *3* ••6 A Fig. 9-39 mostra uma caixa cúbica que foi construída com aumenta gradualmente, o centro de massa do sistema se aproxima placas meálicas unformes de espessura desprezível. A caixa não tem de *m3*, se afasta de *m3* ou permanece onde esá?

tampa e tem uma aresaL = 40cm. Deeine (a) acordenadax, (b)

a coordenada *y* e (c) a coordenada z do centro de massa da caixa.

***y* (n1)**

z

m3

Ys

T !m2

m1

r

hidrogênio (H) formam um triângulo equilátero, com o cenro do

triângulo a uma distância *d* = 9,40 X 10-11 m de cada átomo de hidrogênio. O átomo de nitrogênio (N) está no vértice superior de

uma pirâmide, com os rês átomos de hidrogênio formando a base.

A razão enre as massas do nitrogênio e do hidrogênio é 13,9 e a

distância nirogênio-hidrogênio é *L* = 10,14 X 10-1 1 m. Quais são *z*

as coordenadas (a) x e (b) *y* do centro de massa da molécula?

Fero [illegible] entro

y

lurnínio

L

Figura 9-40 Problema 7.

Figura 9-36 Problema 3.

•••8 Uma lata homogênea tem uma massa de 0,140 kg, uma altura

••4 Na Fig. 9-37, rês barras finas e

y

de 12,0 cm e contém 0,354 g de refrigerane (Fig. 9-41). Pequenos

uniformes, de comprimento *L* = 22

furos são feitos na base e na tampa (com perda de massa desprezícm, formam um U invertido . Cada vel) para drenar o líquido. Qual é a altura *h* do cenro de massa da

barra vertical tem uma massa de 14 *T*

lata e seu conteúdo (a) inicialmente e (b) após a lata perder todo o

L* - *L* ,*Tx

g; a barra horizonal tem massa de 42

L

refrigerante? (c) O que acontece com *h* enquanto o refrigerante está

g. Quais são (a) a coordenada x e (b)

sendo drenado? (d) Se *x* é a altura do refrigerante que ainda resta

a coordenada *y* do centro de massa do 1

1 na lata em um dado instante, determine o valor de x no instante em

sistema?

que o centro de massa atinge o ponto mais baixo.

Figura 9-37 Problema 4.

••5 Quais são (a) a coordenada x e (b) a coordenada *y* do cenro de

massa da placa homogênea da Fig. 9-38 se *L* = 5,0 cm?

y

T

I ·

2L

4L

i •

de massa das duas pedras em *t* = 300 ms? (Suponha que as pedras

ainda não chegaram ao solo.) (b) Qual é a velocidade do centro de O carrinho é liberado a partir do repouso e o carrinho e o bloco se massa das duas pedras nesse instante?

movem até que o carrinho atinja a polia. O arito entre o carrinho e

• 1 O Um automóvel de 100 kg esá parado em um sinal de trânsito. o rilho de ar e o atrito da polia são desprezíveis. (a) Qual é a ace

No instante em que o sinal abre, o automóvel começa a se mover leração do cenro de massa do sistema carrinho-bloco em termos com uma aceleração constante de 4,0 m/s2• No mesmo insante, um dos vetores unitários? (b) Qual é o vetor velocidade do CM em funcaminhão de 2000 kg, movendo-se no mesmo senido com veloci

ção do tempo *t?* (c) Plote a trajetória do CM. (d) Se a rajetória for

dade constante de 8,0 m/s, ulrapassa o automóvel. (a) Qual é a dis curva, veriique se apresena um desvio para cima e para a direita tância enre o CM do sistema carrC:aminhão e o sinal de rânsito ou para baixo e para a esquerda em relação a uma linha reta; se for em *t* = 3,0 s? (b) Qual é a velocidade do CM nesse instante?

retilínea, calcule o ângulo da trajetória com o eixo x.

• 11 Uma grande azeitona *(m* = 0,50 kg) está na origem de um sis-

y

tema de coordenadas *y* e uma grande castanha-do-pará *(M* = 1,5 kg)

-

A

A

está no ponto (1,0, 2,0) m. Em *t* = O, uma força *F.* = (2,0i + 3,0j)

-

A

A

N começa a agir sobre a azeitona e uma força : = (-3,0i +*2,0j)*

N começa a agir sobre a casanha. Em termos dos vetores unitários,

qual é o deslocamento do centro de massa do sistema azeitona-castanha em *t* = 4,0 s em relação à sua posição em *t* = O?

•12 Dois patinadores, um de 65 kg e ouro de 40 kg, estão em

uma pista de gelo e seguram as extremidades de uma haste de 10

m de comprimento e massa desprezível. Os patinadores se puxam

ao longo da haste até se encontrarem. Qual é a distância percorrida Figura 9-44 Problema 15.

pelo painador de 40 kg?

••13 Um canhão dispara um projétil com uma velocidade inicial • • • 16 Ricardo, com 80 kg de massa, e Carmelia, que é mais leve, *v*

estão apreciando o pôr-do-sol no lago Mercedes em uma canoa de

***0* = 20 m/s e um ângulo *80* = 60º com a horizontal. No ponto mais alto da rajetória, o projétil explode em dois fragmentos de massas 30 kg. Com a canoa imóvel nas águas calmas do lago, o casal roca iguais (Fig. 9-42). Um fragmento, cuja velocidade imediaamente de lugar. Seus assentos esão separados por uma distância de 3,0 m após a colisão é zero, cai verticalmente. A que distância do canhão e simetricamente dispostos em relação ao cenro da embarcação. Se, cai o outro ragmento, supondo que o terreno é plano e que a resis com a troca, a canoa se desloca 40 cm em relação ao aracadouro, tência do ar pode ser desprezada?**

qual é a massa de Carmelita?

•••17 Na Fig. *9-45a,* um cachorro de 4,5 kg esá em um barco de

Explosão

18 kg a uma distância *D* = 6, 1 m da margem. O animal caminha

_,*II.*

,

2,4 m ao longo do barco, na direção da margem, e para. Supondo

que não há arito entre o barco e a água, determine a nova distância

entre o cão e a margem. ***(Sugestão:*** **veja a Fig.** ***9-45b.)***

\ ssssJs sJ

Figua 9-42 Problema 13.

[illegible] [illegible]

(a)

• • 14 Na Fig. 9-43, duas paríiculas são lançadas da origem do siste

-

ma de coordenadas no instante *t* = O. A partícula 1, de massa m1 =

5,00 g, é lançada horizontalmente para a direita, em um piso sem ari

Deslocamento do cachorro*, d,.* .

to, com uma velocidade escalar de 10,0 m/s. A partícula 2, de massa

l ,

--. --

m

Deslocamento do

-

2 **= 3 ,00 g, é lançada com uma velcidade escalar de 20,0 m/s e um**

ângulo al que se mantém verticalmente acima da partícula 1 . (a) Qual

barco, db

é a altura máxima Hmu alcançada pelo CM do sistema de duas parí
Figura 9-45 Problema 17.

(b)

culas? Em termos dos vetores unitários, quais são (b) a velocidade e

(c) a aceleração do CM ao atingir a altura máxima H..,?

Seção 9-5 O Momento Linear de um Sistema de

y

Partículas

•18 Uma bola de 0,70 kg está se movendo horizontalmente com

2 /

uma velocidade de 5,0 m/s quando se choca com uma parede verti

cal e ricocheteia com uma velocidade de 2,0 m/s. Qual é o módulo

Figura 9-43 Problema 14.

da variação do momento linear da bola?

•19 Um caminhão de 2100 kg viajando para o norte a41 /h vira

••15 A Fig. 9-44 mosra um arranjo com um trilho de ar no qual para leste e acelera até 51 kh. (a) Qual é a variação da energia um carrinho esá preso por uma corda a um bloco pendurado. O cinéica do caminhão? Quais são (b) o módulo e (c) o sentido da carrinho tem massa m

variação do momento?

1 = 0,600 kg e o centro do carrinho está inicialmente nas coordenadas *y* (-0,500 m, O m); o bloco em massa ••20 No insante *t* = O, uma bola é lançada para cima a partir do m *2* = 0,40 kg e o cenro do bloco está inicialmente nas coordenads nível do solo, em terreno plano. A Fig. 9-46

mostra o módulo *p* do *y* (O, -0,100 m). As massas da corda e da polia são desprezíveis. momento linear da bola em função do tempo *t* após o lançamento

p (kg · m/s)

PARTE 1

CENTRO DE MASSA E MOMENTO LINEAR

239

p =

=

0

6,0 kg · m/s e *p1* 4,0 kg · m/s). Determine o ângulo de lan

çamento. *(Sugestão:* procure uma solução que não envolva a leitura

no gráico do instante em que passa pelo valor mínimo.)

o

***Pio* 1 2**

4 5

Figura 9-46 Problema 20.

***t* (s)**

••21 Uma bola de *sotbal* de 0,30 kg tem uma velocidade escalar

de 15 m/s e um ânulo de 35º abaixo da horizontal imediaamente

antes de ser golpeada por um taco. Qual é o módulo da variação

do momento linear da bola na colisão com o taco se a bola adquire

uma velocidade escalar (a) de 20 m/s, verticalmente para baixo; (b)

de 20 m/s, horizontalmente na direção do lançador?

••22 A Fig. 9-47 mostra uma visa superior da trajetória de uma

bola de sinuca de 0,165 kg que se choca com uma das abelas. A

velocidade escalar da bola antes do choque é 2,00 m/s e o ângulo

} 1 é 30,0º. O choque inverte a componente *y* da velocidade da bola,

mas não altera a componente *x*. Determine (a) o ângulo 8 *2* e (b) a

**variação do momento linear da bola em termos dos vetores unitários. (O
fato de que a bola está rolando é irrelevante para a solução do**

problema.)

Figura 9-48 Problema 23. Mergulho de barriga em um tanque

com 30 cm de água. ***(George Long!Sports Ilustrate©Time, Inc.)***

y

10 m/s. (a) Qual é o impulso recebido pela bola durante o contato

com o piso? (b) Se a bola ica em contato com o piso por 0,020 s,

qual é a força média exercida pela bola sobre o piso?

•26 Em uma brincadeira comum, mas muito perigosa, alguém puxa

uma cadeira quando uma pessoa está prestes a se sentar, fazendo

com que a vítima se estatele no chão. Suponha que a vítima tem 70

Figura 9-47 Problema 22.

-----*X* kg, cai de uma altura de 0,50 m e a colisão com o piso dura 0,082 s.

Qual é o módulo (a) do impulso e b) da força média aplicada pelo

piso sobre a pessoa durante a colisão?

Seção 9-6 Colisão e Impulso

•27 Uma força no sentido negaivo de um eixo *x* é aplicada por 27

•23

- Com mais de 70 anos de idade, Henri LaMothe Fig. ms a uma bola de 0,40 kg que esava se movendo a 14 m/s no senti9-48) assombrava os espectadores mergulhando de barriga de uma do positivo do eixo. O módulo da força é variável e o impulso tem altura de 12 m em um tanque de água com 30 cm de profundida um módulo de 32,4 N · s.

Quais são (a) o módulo e (b) o sentido da de. Supondo que o corpo do mergulhador parava de descer quando velocidade da bola imediatamente após a aplicação da força? Quais estava prestes a chegar ao fundo do tanque e estimando sua massa, são (c) a intensidade média da força e (d) a orientação do impulso calcule o módulo do impulso que a á

aplicado à bola?

ua exercia sobre Henri em

um desses merulhos.

•28

-No tae-kwon-do, a mão de um atleta ainge o alvo com

•24 _ [illegible] Em fevereiro de 1955, um paraquedista saltou de um uma velocidade de 13 m/s e para após 5,0 ms. Supoha que, durante avião, caiu 370 m sem conseguir abrir o paraquedas e aterrissou o choque, a mão é independente do braço e tem uma massa de O, 70

em um campo de neve, sofrendo apenas pequenas escoriações. Su kg. Determine o módulo (a) do impulso e b) da força média que a ponha que a velocidade do paraquedista imediatamente antes do mão exerce sobre o alvo.

impacto era 56 *ls* (velocidade terminal), a massa (incluindo os •29 Um bandido aponta uma meralhadora para o peito do Suequipamentos) era 85 kg e a força da neve sobre o seu corpo tenha per-Homem e dispara 100 balas/mn. Suponha que a massa de cada atingido o valor (relativamente seguro) de 1,2 X 105 N. Determine bala é 3 g, a velocidade das balas é 500 m/s e as balas ricocheteiam (a) a profundidade da neve mnima para que o paraquedista ater no peito do super-herói sem perder velocidade. Qual é o módulo rissasse sem ferimentos graves e (b) o módulo do impulso da neve da força média que as balas exercem sobre o peito do Super-H o sobre o paraquedista.

mem?

•25 Uma bola de 1,2 kg cai verticalmente em um piso com uma ••30 *Das forçs médis.* Uma série de bolas de neve de0,250 kg velocidade de 25 m/s e ricocheeia com uma velocidade inicial de é disparada perpendicularmente conra uma parede com uma velo-

t

θ_1
$\vec{v}_1$
y
x

cidade de 4,00 m/s. As bolas ficam grudadas na parede. A Fig. 9-49 • •34

- O lagarto basilisco é capaz de correr na superfície da

mosra o módulo F da força sobre a parede em função do tempo t água (Fig. 9-52). Em cada passo, o lagarto bate na água com a pata para dois chques consecuivos. Os choques ocorrem a intervalos e a mergulha ão depressa que uma cavidade de ar se forma acima lt, = 50,0 ms, duram um intervalo de tempo ltd = 10 ms e produ da paa. Para não ter que puxá-la de volta sob a ação da força de zem riângulos isósceles no gráico, com cada choque resultando arrasto da áua, o lagarto levanta a pata antes que a água penere em uma força máxima Fmx = 200 N. Para cada chque, qual é o na cavidade de ar. Para que o lagarto não afunde, o impulso médio módulo (a) do impulso e (b) da força média aplicada à parede? (c) para cima exercido durante esta manobra de bater na água com a Em um intervalo de tempo correspondente a muitos choques, qual paa, afundá-la e recolhê-la deve ser igual ao impulso para baixo é o módulo da força média exercida sobre a parede?

exercido pela força gravitacional. Supoha que a massa de um l a garto basilisco é 90,0 g, a massa de cada pata é 3,00 g, a velocidade F

de uma pata ao bater na áua é 1,50 m/s e a duração de um passo

é 0,600 s . (a) Qual é o módulo do impulso que a á

F.nx

ua exerce sobre

o lagarto quando o animal bate com a pata na água? (Supoha que

este impulso está orienado vericalmente para cima.) (b) Durante

os 0,600 s de um passo, qual é o impulso para baixo sobre o lagarto

devido à força gravitacional? (c) O principal movimento responsável

- -

-

-- .t,- - - - -i

pela sustentação do lagarto é o de bater a pata na água, o de afundar

Figura 9-49 Problema 30.

a pata na água ou ambos conribuem igualmente?

••31

- *Pulando antes do choque.* Quando o cabo de sustentação arrebenta e o sistema de segurança falha, um elevador cai em queda livre de uma altura de 36 m. Durante a colisão no fundo do

poço do elevador, a velocidade de um passageiro de 90 kg se anula

em 5,0 ms. (Supoha que não há ricochete nem do passageiro nem

do elevador.) Qual é o módulo (a) do impulso e (b) da força média

experimenada pelo passageiro durante a colisão? Se o passageiro

pula verticalmente para cima com uma velocidade de 7 ,O m/s em

relação ao piso do elevador quando o elevador está prestes a se

chocar com o fundo do poço, qual é o módulo (c) do impulso e (d)

da força média (supondo que o tempo que o passageiro leva para

parar permanece o mesmo)?

••32 Um carro de brinquedo e 5,0 kg pode se mover ao longo de

um eixo *x;* a Fig. 9-50 mosra a componente *F,* da força que age sobre o carro, que parte do repouso no insnte *t* = O. A escala do eixo *x* é Figura 9-52 Problema 34. Um lagarto correndo na água.

denida por *F,* = 5,0 N. Em ermos dos vetores unitários, determine *(Stephen Dalton/Photo Researchers)* (a) p em *t* = 4,0 s; (b) p em *t* = 7,0 s; (c) i em *t* = 9,0 s.

• •35 A Fig. 9-53 mostra um grico aproximado do módulo da

Fx (N)

força *F* em unção do tempo *t* para uma colisão de uma Superbo

1

la de 58 g com uma parede. A velocidade inicial da bola é 34 m/s,

. l

•

-

J

,_

velocidade v *2* de módulo

uma força horizontal começa a agir sobre o disco. A força é dada

-

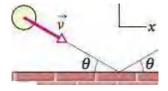
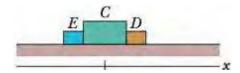
10,0 m/s. A duração da colisão é 2,00 ms. Quais são (a) o módulo e

-

por *F* = (12,0 - 3,00t2)i, comF emnewtons e tem segundos, e age

(b) a orienação (em relação ao semieixo *x* positivo) do impulso do até que o módulo se anule. (a) Qual é o módulo do impulso da força taco sobre a bola? Quais são (c) o módulo e (d) o senido da força sobre o disco entre *t* = 0,500 s e *t* = 1,25 s? (b) Qual é a variação média que o taco exerce sobre a bola?

do momento do disco enre *t* = O e o instante em que *F* = O?

$$F(t) = [(6,0 \times 10^6)t - (2,0 \times 10^9)t^2]\ \mathrm{N}$$

••37 Um jogador de futebol chuta uma bola de massa 0,45 kg que • •43

- Na Olimpíada de 708 a.e., aluns atletas disputaram

se enconra inicialmente em repouso. O pé do jogador ica em con a prova de salto em distância segurando pesos chamados de *halteres* tato com a bola por 3,0 X 10-3 s e a força do chute é dada por

para melhorar o desempenho (Fig. 9-56). Os pesos eram colocados

à frente do corpo antes de iniciar o salto e arremessados para trás

durante o salto. Suponha que um atlea moderno de 78 kg use dois

para O ; *t* ; 3,0 X 1 0 -3 s, onde t está em segundos. Determine o halteres de 5,50 kg, arremessando-os horizontalmente para rás ao módulo (a) do impulso sobre a bola devido ao chute, (b) da força atingir a altura máxima, de al forma que a velocidade horizonal média exercida pelo pé do jogador sobre a bola durante o contato, (c) dos pesos em relação ao chão seja zero. Suponha que a velocidade A

A

da força máxima exercida pelo pé do jogador sobre a bola durante inicial do atleta seja v = (9,5i +4,0j) m/s com ou sem os haleres o contato e (d) da velocidade da bola imediatamente após perder o e que o terreno seja plano. Qual é a diferença entre as disâncias que contato com o pé do jogador.

o atleta conseue saltar com e sem os halteres?

••38 Na visa superior da Fig. 9-54, uma bola de 300 g com uma

velocidade escalar *v* de 6,0 *ls* se choca com uma parede com um ânulo J de 30º e ricocheteia com a mesma velocidade escalar e o

mesmo ângulo. A bola permanece em contato com a parede por 1 O

ms. Em termos dos vetores unirios, qual é (a) o impulso da parede

sobre a bola e (b) a força média da bola sobre a parede?

- *V* Figura 9-56 Problema 43.

(Réunion des Musées Nationa/

Art Resource)

Figura 9-54 Problema 38.

-

- • • 44 Na Fig. 9-57, um bloco inicialmente em repouso explode em

Seção 9-7 Consevação do Momento Linear

dois pedaços, *E* e *D*, que deslizam sobre um piso em um trecho sem

•39 Um homem de 91 kg em repouso em uma superície horizonal atrito e depois enram em regiões com atrito, onde acabam parande arito desprezível arremessa uma pedra de 68 g com uma velo do. O pedaço *E*, com uma massa de 2,0 kg, encontra um coeiciente

=

cidade horizontal de 4,0 m/s. Qual é a velocidade do homem após de atrito cinético *μE* 0,40 e chega ao repouso em uma distância

=

o arremesso?

dE 0,15 m. O pedaço *D* encontra um coeiciente de atrito cinético

μ = 0,50 e desliza até o repouso em uma distância *d* = 0,25 m.

•40 Uma nave espacial esá se movendo a 4300 km/h em relação

0

0

Qual era a massa do bloco?

à Terra quando, após ter queimado todo o combusível, o motor do

fouete (de massa *4m)* é desacoplado e ejetado para trás com uma

velocidade de 200 m/s quando, devido a uma arremessar esses blocos para longe do bloco *C*, ao longo do eixo *x*. explosão intena, se quebra em três pedaços. Um dos pedaços, com Considere a se

=

uinte sequência: (1) No instante *t*

O, o bloco *E* é uma massa de 10,0 kg, se afasa do ponto da explosão com uma

arremessado para a esquerda com uma velocidade de 3,00 m/s *em* velocidade de 100 m/s no sentido posiivo do eixo *y*. Um se *relação* à velocidade que a explosão imprime ao resto do fo

undo

uete.

pedaço, com uma massa de 4,00 kg, se move no sentido negaivo do

(2) No insante =

***t* 0,80 s, o bloco *D* é aremessado para a direita eixo *x* com uma velocidade de 500 m/s. (a) Em termos dos vetores com uma velocidade de 3,00 m/s *em relação* à velocidade do bloco unitários, qual é a velocidade da terceira parte? (b) Qual é a energia *C* nesse momento. No instante =**

***t* 2,80 s, quais são (a) a velocidade liberada na explosão? Inore os efeitos da força gravitacional.**

do bloco *C* e (b) a posição do centro do bloco *?*

• •46 Um balde de 4 kg que está deslizando em uma superície sem

atrito explode em dois fragmentos de 2,0 kg, um que se move para

o norte a 3,0 m/s e outro que se move em uma dição 30° ao norte

do leste a 5,0 m/s. Qual era a velocidade escalar do balde antes da

Figura 9-55 Problema 41.

o

explosão?

••47 Uma taça em repouso na origem de um sistema de coord e

••42 Um objeto de massa m e velocidade *v* em relação a um ob nadas *y* explode em três pedaços. Logo depois da explosão, um servador explode em dois pedaços, um com massa três vezes maior dos pedaços, de massa *m,* está se movendo com velocidade (-30

que o ouro; a explosão ocorre no espaço sideral. O pedaço de menor

A

m/s)i e um seundo pedaço, também de massa *m*, está se movendo

massa ica em repouso em relação ao observador. Qual é o aumento com velocidade (-30 m/s)j. O terceiro pedaço tem massa 3m. D e -

da energia cinéica do sistema causado pela explosão, no referencial termine (a) o módulo e (b) a orientação da velocidade do terceiro do observador?

pedaço logo após a explosão.

• • •48 Uma partícula *A* e uma partícula *B* são empurrads uma con Arábia Saudita, nas chamadas CVC (colisões entre um veículo e um ra a outra, comprimindo uma mola colocada entre as duas. Quando camelo). (b) Que porcentagem da energia cinética do carro é perdida as partículs são liberadas, a mola s arremessa em senidos opostos. se a massa do camelo é 30 kg? (c) No caso geral, a perda percentual A massa de *A* é

2,00 vezes a massa de *B* e a energia armazenada aumena ou diminui quando a massa do animal diminui?

na mola era 60 J. Suponha que a mola tem massa desprezível e que ••54 Uma colisão rontal perfeitamente inelástica ocorre enre toda a energia armazenada é transferida para as partículas. Depois duas bolas de massa de modelar que se movem ao longo de um de terminada a ransferência, qual é a energia cinética (a) da partí eixo vertical. Imediatamente antes da colisão, uma das bolas, de cula *A* e (b) da partícula *B?*

massa 3,00 kg, está se movendo para cima a 20 m/s e a outra bola,

de massa 2,0 kg, está se movendo para baixo a 12 m/s. Qual é a

Seção 9-9 Colisões lnelásticas em Uma Dimensão

altura máxima atingida pelas duas bolas unidas acima do ponto de

•49 Uma bala com 10 g de massa se choca com um pêndulo ba colisão? (Despreze a resistência do ar.) lístico com 2,00 kg de massa. O centro de massa do pêndulo sobe ••55 Um bloco de 5,0 kg com uma velocidade escalar de 3,0 m/s uma distância vertical de 12 cm. Supondo que a bala ica alojada colide com um bloco de 1 O kg com uma velocidade escalar de 2,00

no pêndulo, calcule a velocidade inicial da bala.

m/s que se move na mesma direção e sentido. Após a colisão, o

•50 Uma bala de 5,20 g que se move a 672 m/s atinge um bloco de bloco de 10 kg passa a se mover no mesmo sentido com uma velo madeira de 700 g inicialmente em repouso sobe uma superície sem cidade de 2,5 m/s. (a) Qual é a velocidade do bloco de 5,0 kg imeatrito. A bala atravessa o bloco e sai do outro lado com a velocidade diatamente após a colisão? (b) De quanto varia a energia cinética reduzida para 428 m/s. (a) Qual é a velocidade inal do bloco? (b) total do sistema dos dois blocos por causa da colisão? (c) Suponha Qual é a velocidade do centro de massa do sistema bala-bloco?

que a velocidade do bloco de 10 kg após o choque é 4,0 m/s. Qual

••51 Na Fig. 9-58a, uma bala de 3,50 g é disparada horizontal é, nesse caso, a variação da energia cinética total? (d) Explique o mente contra dois blocos inicialmente em repouso sobre uma mesa resulado do item (c).

sem arito. A bala aravessa o bloco 1 (com 1,20 kg de massa) e ica ••56 Na siuação "antes" da Fig. 9-60, o carro *A* (com uma massa alojada no bloco 2 (com 1,80 kg de massa). Os blocos terminam com de 1100 kg) esá parado em um sinal de trânsito quando é atingivelocidades v *1* = 0,630 m/s e v *2* = 1,40 m/s (Fig. 9-58b). Desprezan do na raseira pelo carro *B* (com uma massa de 1400 kg). Os dois do o material removido do bloco 1 pela bala, enconre a velocidade carros derrapam com as rodas bloqueadas até que a força de atrito da bala (a) ao sair do bloco 1 e (b) ao enrar no bloco 1.

com o asfalto molhado (com um coeiciente de atrito ,* de 0,13)

1

os leva ao repouso depois de percorrerem distâncias dA = 8,2 m e

1

***L* Se1n atrito *d8* = 6, 1 m. Qual é a velocidade escalar (a) do carro *A* e b) do carro t**

1

1

***B* no início da derrapagem, logo após a colisão? (c) Supondo que**

o momento linear é conservado na colisão, determine a velocidade

(a)

escalar do carro *B* pouco antes da colisão. (d) Explique por que esta

suposição pode não ser realista.

-

--

Vo

,

r

Antes

1--

•

A

(b)

Figura 9-58 Problema 51.

••52 Na Fig. 9-59, uma bala de 10 g que se move verticalmente

para cima a 1000 m/s se choca com um bloco de 5,0 kg inicialmente

Depois

em repouso, passa pelo cenro de massa do bloco e sai do outro lado

A

com uma velocidade de 400 m/s. Qual é a altura máxima atingida

pelo bloco em relação à posição inicial?

Figura 9-60 Problema 56.

1

• 1

1 • • 57 Na Fig. 9-61, uma bola de massa *m* = 60 g é disparada com

velocidade *V;* = 22 m/s para dentro do cano de um canhão de mola

de massa *M* = 240 g inicialmente em repouso sobre uma superfície

sem arito. A bola ica presa no cano do canhão no ponto de máxima

Figura 9-59 Problema 52.

Bala

compressão da mola. Suponha que o aumento da energia térmica

devido ao arito da bola com o cano é desprezível. (a) Qual é a v e

• •53 Em Anchorage, as colisões de um veículo com um alce são locidade escalar do canhão depois que a bola para dentro do cano?

ão comuns que receberam o apelido de CV A . Suponha que um carro (b) Que fração da energia cinéica inicial da bola ica armazenada de 100 kg derrapa até aropelar um alce esacionário de 50 kg em na mola?

uma esrada muito escorregadia, com o alce atravessando o para-brisa

(o que acontce muitas vezes nesse tipo de atropelamento). (a) Que

porcenagem da energia cinéica do carro é transformada pela colisão

em ouras formas de energia? Acidentes semelhantes acontecem na Figura 9-61 Problema 57.

v_1
2
1
2
$\vec{v}_{Ai}$
$\vec{v}_{Af} = ?$
1
2
1

• • • 58 Na Fig. 9-62, o bloco 2 (com uma massa de 1,0 kg) está em tinha uma velocidade de 3,00 m/s. Qual é a velocidade (a) do cenro repouso sobre uma superfície sem arito e em conato com uma das de massa e (b) do bloco 2 após a colisão?

exremidades de uma mola relaxada de constante elástica 200 N/m. ••64 Uma bola de aço de massa 0,500 kg está presa em uma exre

A outra extremidade da mola está presa em uma parede. O bloco 1 midade de uma corda de 70,0 cm de comprimento. A outra extremi

(com uma massa de 2,0 kg), que se move com uma velocidade *v* 1 = dade está ixa. A bola é liberada quando a corda esá na horizonal 4,0 m/s, colide com o bloco 2 e os dois blocos permanecem juntos. (Fig. 9-65). Na parte mais baixa da trajetória, a bola se choca com No instante em que os blocos param momenneamente, qual é a um bloco de metal de 2,50 kg inicialmente em repouso sobre uma compressão da mola?

1

superfície sem atrito. A colisão é elástica. Determine (a) a velo1

cidade escalar da bola e (b) a velocidade escalar do bloco, ambas

Figura 9-62 Problema 58.

1

imediaamente após a colisão.

•••59 Na Fig. 9-63, o bloco 1 (com uma massa de 2,0 kg) está se

movendo para a direita com uma velocidade escalar de 10 m/s e o

bloco 2 (com uma massa de 5,0 kg) está se movendo para a direita

com uma velocidade escalar de 3,0 m/s. A superfície não tem atrito

e uma mola com uma constante elásica de 1120 N/m está presa no

bloco 2. Quando os blocos colidem, a compressão da mola é máxima

no instante em que os blocos têm a mesma velocidade. Determine Figura 9-65 Problema 64.

a máxima compressão da mola.

••65 Um corpo com 2,0 kg de massa sore uma colisão elásica

com um corpo em repouso e continua a se mover na mesma direção e

Figura 9-63 Problema 59.

sentido, mas com um quarto da velocidade inicial. (a) Qual é a massa

do outro corpo? (b) Qual é a velocidade do cenro de massa dos dois

corpos se a velocidade inicial do corpo de 2,0 kg era 4,0 m/s?

Seção 9-1 o Colisões Elásticas em Uma Dimensão

••66 O bloco 1, de massa *m,* e velocidade 4,0 m/s, que desliza ao

•60 Na Fig. 9-4, o bloco *A* (com uma massa de 1,6 kg) desliza longo de um eixo *x* em um piso sem atrito, sofre uma colisão elástiem direção ao bloco *B* (com uma massa de 2,4 kg) ao longo de ca com o bloco 2 de massa *m* uma superície sem atrito. Os sentidos de três velocidades antes

***2 = 0,40m1,* inicialmente em repouso.**

Os dois blocos deslizam para uma região em que o coeficiente de

***(i)* e depois () da colisão estão indicados; as velocidades escalares atrito cinético é 0,50, onde acabam parando. Que distância dentro correspondentes são *VA;* = 5,5 *ls, vi* = 2,5 m/s e *v81* = 4,9 *ls.* dessa região é percorrida (a) pelo bloco 1 e (b) pelo bloco 2?**

Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para a esquerda ou para a

direita) da velocidade

••67 Na Fig. 9-66, a partícula 1, de massa m

vAJ· (c) A colisão é elástica?

1 = 0,30 kg, desliza

-

para a direita ao longo de um eixo x em um piso sem arito com uma

velocidade escalar de 2,0 m/s. Quando chega ao ponto x = O, sore

Vs·

1 1 > • l uma colisão elástica unidimensional com a partícula 2 de massa

$m2$ = 0,40 kg, inicialmente em repouso. Quando a partícula 2 se

i

choca com uma parede no ponto xP = 70 cm, ricocheteia sem perder
velocidade escalar. Em que ponto do eixo x a partícula 2 volta

V

a colidir com a partícula 1?

Jt

-->"

Figura 9-64 Problema 60.

-

- + - +- x (cm)

•61 Um carriho de massa com 340 g de massa, que se move em Figura 9-
66 Problema 67.

o

uma pista de ar sem atrito com uma velocidade inicial de 1,2 m/s,

sofre uma colisão elástica com um carinho inicialmente em repouso

de massa desconhecida. Após a colisão, o primeiro carriho con ••68 Na Fig. 9-67, o bloco 1 de massa m1 desliza sem velocidade tinua a se mover na mesma direção e senido com uma velocidade inicial ao longo de uma rampa sem arito a partir de uma altura *h* =

escalar de 0,66 m/s. (a) Qual é a massa do segundo carriho? (b) 2,50 m e colide com o bloco 2 de massa *mi* = 2,00m1, inicialmente Qual é a velocidade do segundo carrinho após a colisão? (c) Qual em repouso. Após a colisão, o bloco 2 desliza em uma região onde é a velocidade do centro de massa do sistema dos dois carihos?

o coeficiente de arito cinético ,k é 0,500 e para depois de percorrer uma disância *d* nessa região. Qual é o valor da distância *d* se a

•62 Duas esferas de itânio se aproximam com a mesma velocidade colisão é (a) elásica e (b) perfeitamente inelástica?

escalar e sofrem uma colisão elástica frontal. Após a colisão, uma

das esferas, cuja massa é 300 g, permanece em repouso. (a) Qual é

a massa da oura esfera? (b) Qual é a velocidade do cenro de massa

T

das duas esferas se a velocidade escalar inicial de cada esfera é de

2,00 m/s?

h

••63 O bloco 1 de massa *m*

30j)m/s e v

A

A

0 = (-lOi + 5,0j)

separação, como no caso das bolas de beisebol e basquete da Fig. *!s.* Após a colisão, . = (- 5, Oi + 20 j) m/s. Determine (a) a velo-9 -68a) e as duas bolas são deixadas cair simultaneamente de uma cidade nal de *B* e (b) a variação da energia cinética total (incluindo altura *h* = 1,8 m. (Suponha que os raios das bola são desprezíveis o sinal).

em comparação com h.) (a) Se a bola maior ricocheteia elasticamente ••75 O próton 1, com uma velocidade de 500 m/s, colide elastino chão e depois a bola menor ricocheteia elasticamente na maior, camente com o próton 2, inicialmente em repouso. Depois do choque valor de *m* faz com que a bola maior pare momentaneamente que, os dois prótons se movem em rajetórias perpendiculares, com no instante em que colide com a menor? (b) Nesse caso, que altura a trajetória do próton 1 fazendo 60º com a direção inicial. Após a atinge a bola menor (Fig. 9-68b)?

l colisão, qual é a velocidade escalar (a) do próton 1 e (b) do próton

2?

Seção 9-12 Sistemas de Massa Variável: Um Foguete

Bola de

•76 Uma sonda espacial de 6090 kg, movendo-se com o nariz à

-beisebol

frente em direção a Júpiter a uma velocidade de 105 m/s em relação

ao Sol, aciona o motor, ejetando 80,0 kg de produtos de combustão a

uma velocidade de 253 m/s em relação à nave. Qual é a velocidade

'

inal da nave?

l Bola de

,

• 77 Na Fig. 9-70, duas longas barcaças estão se movendo na mesbasquete * ma direção em águas ranquilas, uma com uma velocidade escalar de 10 km/h e a oura com uma velocidade escalar de 20 k/h.

Quando estão passando uma pela oura, operários jogam carvão da

Figura 9-68 Problema 69.

(a) ntes

(b) Depois

barcaça mais lena para a mais rápida a uma taxa de 1000 kg/min.

Que força adicional deve ser fonecida pelos motores (a) da barcaça

mais rápida e (b) da barcaça mais lenta para que as velocidades não

•••70 Na Fig. 9-69, o disco 1, de massa m1 = 0,20 kg, desliza mudem? Suponha que a transferência de carvão é perpendicular à sem atrito em uma bancada de laboratório até sofrer uma colisão direção do movimento das barcaças e que a força de atrito enre as unidimensional com o disco 2, inicialmente em repouso. O disco barcaças e a água não depende da massa das barcaças.

2 é arremessado para fora da bancada e vai cair a uma disância *d*

da base da bancada. A colisão faz o disco 1 inverter o movimento

e ser arremessado para fora da oura extremidade da bancada, indo

cair a uma distância *2d* da base oposta. Qual é a massa do disco 2?

***(Sugestão:* tome cuidado com os sinais.)**

1

2

,

. '

•

•

- 2dj

Figura 9-69 Problema 70.

Seção 9-11 Colisões em Duas Dimensões

••71 Na Fig. 9-21, a partícula 1 é uma partícula alfa e a partícula

2 é um núcleo de oxigênio. A partícula alfa é espalhada de um ân Figura 9-70 Problema 77.

gulo J1 = 64,0º e o núcleo de oxigênio recua com uma velocidade

escalar de 1,20 X 105 m/s e um ângulo J2 = 51,0º. Em unidades •78 Considere um foguete que está no espaço sideral em repouso de massa atômica, a massa da partícula alfa é 4,00 u e a massa do em relação a um referencial inercial. O motor do foguete deve ser núcleo de hidrogênio é 16,0 u. Qual é a velocidade (a) nal e (b) acionado por um certo intervalo de tempo. Determine a *razão e* inicial da partícula alfa?

***massa* do foguete (razão entre as massas inicial e final) nesse inter**

••72 A bola *B*, que se move no senido positivo de um eixo *x* com valo para que a velocidade original do foguete em relação ao refevelocidade *v*, colide com a bola *A* inicialmente em repouso na ori rencial inercial seja igual (a) à velocidade de exaustão (velocidade gem. *A* e *B* têm massas diferentes. Após a colisão, *B* se move no dos produtos de exausão em relação ao foguete) e (b) a duas vezes sentido negativo do eixo *y* com velocidade escalar v/2. (a) Qual é a velocidade de exaustão.

a orientação de *A* após a colisão? (b) Mosre que a velocidade de *A* •79 Um foguete que se enconra no espaço sideral e está inicialnão pode ser determinada a parir das informações dadas.

mente em repouso em relação a um referencial inercial tem uma

••73 Após uma colisão perfeiamente inelástica, dois objetos de massa de 2,55 X 105 kg, da qual 1,81 X 105 kg são de combustível.

mesma massa e mesma velocidade escalar inicial deslocam-se jun O motor do foguete é acionado por 250 s, durante os quais o comtos com metade da velocidade inicial. Determine o ângulo entre as bustível é consumido à axa de 480 kg/s. A velocidade dos produtos velocidades iniciais dos objetos .

de exaustão em relação ao foguete é 3,27 /s. (a) Qual é o empuxo

do foguete? Após os 250 s de funcionamento do motor, quais são

(b) a massa e (c) a velocidade do foguete?

Figura 9-72 Problema 83.

'

Problemas dicionais

84 A Fig. 9 -73 mostra uma visa superior de duas paríulas que

80 Um objeto é rasreado por uma esação de radar e se veriica que deslizam com velocidade constante em uma superície sem arito.

A

A

A

seu vetor posição é dado por *r* = (3500-160t)i + 2700j + 300k, As partículas têm a mesma massa e a mesma velocidade escalar com *r* em meros e *t em* segundos. O eixo *x* da estação de radar inicial *v* = 4,00 /s e colidem no ponto em que s trajetórias se aponta para leste, o eixo *y* para o norte e o eixo z vericalmente para interceptam. Um eixo *x* coincide com a bisseriz do ângulo entre cima. Se o objeto é um foguete meteorológico de 250 kg, quais são as trajetórias incidentes e J = 40,0º. A região à direita da colisão (a) o momento linear do foguete, (b) a direção do movimento do está dividida em quaro partes, identicadas por letras, pelo eixo *x* foguete e (c) a força que age sobre o foguete?

e quaro reas tracejadas numeradas. Em que região ou ao longo de

81 O último estágio de um foguete, que está viajando a uma veloci que reta as partículas viajam se a colisão é (a) perfeitamente inelásdade de 7600 /s, é composto de duas partes presas por uma trava: tica, (b) elástica e (c) inelásica? Quais são as velocidades escalares o invólucro do foguete, com uma massa de 290,0 kg, e uma cápsula inais das partículas se a colisão é (d) perfeitamente inelástica e (e) de carga, com uma massa de 150,0 kg. Quando a rava é aberta, uma elástica?

mola inicialmente comprimida faz as duas partes se separarem com

uma velocidade relativa de 910,0 /s. Qual é a velocidade (a) do

,

invólucro do foguete e (b) da cápsula de carga depois de separados?

***A* ,'2**

,

Suponha que todas as velocidades estão ao longo da mesma linha

, *B*

reta. Determine a energia cinética total das duas partes (c) antes e

9

(d) depois de separadas. (e) Explique a diferença.

82

- *Desabamento de um edifício.* Na seção reta de um

ediício que aparece na Fig. 9-7la, a inraestrutura de um andar

qualquer, *K,* deve ser capaz de sustentar o peso *P* de todos os an Figura 9-73 Problema 84.

dares que estão acima. Normalmente, a infraestrutura é projetada com um fator de segurança s e pode sustentar uma força para 85

***Redutor de velocidade.* Na Fig. 9 -74, o bloco 1 de massa**

baixo *sP* > *P.* Se, porém, as colunas de sustentação entre *K* e *L* m1 desliza ao longo de um eixo *x* em um piso sem atrito, com uma cedem bruscamente e permitem que os andares mais altos caiam velocidade de 4,00 m/s, até sofrer uma colisão elástica unidimensioem queda livre sobre o andar *K* (Fig. 9-71b), a força da colisão nal com o bloco 2, de massa m *2* = 2,00mi, inicialmente em repouso.

pode exceder *sP* e fazer com que, logo depois, o andar *K* caia so Em seguida, o bloco 2 sore uma colisão elástica unidimensional bre o andar *J,* que cai sobre o andar /, e assim por diante, até o com o bloco 3, de massa *m3* = 2,00z, inicialmente em repouso.

andar térreo. Suponha que a distância enre os andares é *d* = 4,0 (a) Qual é a velocidade inal do bloco 3? (b) A velocidade, (c) a m e que todos têm a mesma massa. Suponha também que quando energia cinética e (d) o momento do bloco 3 são maiores, menores os andares que estão acima do andar *K* caiam sobre o andar *K* em ou iguais aos valores iniciais do bloco 1?

queda livre, a colisão leva 1,5 ms. Nessas condições simplificadas,

que valor deve ter o coeiciente de segurança s para que o edifício

não desabe?

Figura 9-74 Problema 85.

i

[illegible] [illegible] [illegible]

==fN

[illegible]

86

- *Amplicador e velocidade.* Na Fig. 9-75, o bloco 1 ,

de massa m1, desliza ao longo de um eixo *x* em um piso sem atrito,

[illegible]

com uma velocidade *v* 1; = 4,00 /s, até sofrer uma colisão elástica

unidimensional com o bloco 2, de massa *m2* = 0,500m1, inicialmente
H=IIJ

em repouso. Em seguida, o bloco 2 sofre uma colisão elástica
unidimensional com o bloco 3 de massa [illegible] = *0,500*

[illegible] I**

***z,* inicialmente**

em repouso. (a) Qual é a velocidade do bloco 3 após a colisão? (b)

(a)

(b)

A velocidade, (c) a energia cinética e (d) o momento do bloco 3 são

Figura 9-71 Problema 82.

maiores, menores ou iguais aos valores iniciais do bloco 1?

83 *"Relativamente" é uma palavra importante.* Na Fig. 9-72, o

I

n2

 3

bloco *E* de massa me = 1,00 kg e o bloco *D* de massa m *0* = 0,500 Figura 9-75 Problema 86.

1 =========-*x*

kg são manidos no lugar com uma mola comprimida enre os dois

blocos . Quando os blocos são liberados, a mola os impulsiona e os

blcos passam a deslizar em um piso sem atrito. (A mola tem massa 87 Uma bola com uma massa de 150 g se choca com uma paredesprezível e cai no piso depois de impulsionar os blocos.) (a) Se de a uma velocidade de 5,2 /s e ricocheteia com apenas 50% da a mola imprime ao bloco *E* uma velocidade de 1,20 /s *relativa* energia cinética inicial. (a) Qual é a velocidade escalar da bola imemente ao piso, que disância o bloco *D* percorre em 0,800 s? (b) Se, diatamente após o choque? (b) Qual é o módulo do ipulso da bola em vez disso, a mola imprime ao bloco *E* uma velocidade de 1,20 sobre a parede? (c) Se a bola permanece em contato com a parede

/s *relativamente* ao bloco *D,* que distância o bloco *D* percorre em por 7 ,6 ms, qual é o módulo da força média que a parede exerce 0,800 s?

sobre a bola durante esse intervalo de tempo?

88 Uma espaçonave é separada em duas partes pela detonação dos está dirigido ao longo da rea que liga os cenros das bolas envolvidas rebites explosivos que as mantêm unidas. As massas das partes são na colisão e é perpendicular às superícies que se tocam.) 1200 kg e 1800 kg; o módulo do impulso que a explosão dos rebites

exerce sobre cada parte é 300 N · s. Com que velocidade relativa as

- 2

duas partes se separam?

"o

-

[illegible]>-- [illegible]

- X

89 Um carro de 1400 kg esá se movendo inicialmente para o norte Figura 9-76 Problema 97.

1

3

a 5,3 /s, no sentido positivo de um eixo *y.* Depois de fazer uma

curva de 90º para a direita em 4,6 s, o motorista desatento bate em

uma árvore, que para o caro em 350 ms. Na notação de vetores 98 Uma bola de 0,15 kg se choca com uma parede com uma veunitários, qual é o impulso sobre o carro (a) devido à curva e (b) locidade de (5,00 *s)i +* *(6,50* s)} + (4,00 *s)k, ricocheteia devido à colisão? Qual é o módulo da força média que age sobre o naparede [illegible] ter uma velocidade de* *(2,00* s)i + (3,50 /s)] +

carro (c) durante a curva e (d) durante a colisão? (e) Qual é a dire (-3,20 /s)k. Determine (a) a variação do momento da bola, (b) o ção da força média que age sobre o carro durante a curva?

impulso exercido pela parede sobre a bola e (c) o impulso exercido

pela bola sobre a parede.

90 Um certo núcleo radioativo (pai) se transforma em um núcleo

diferente (ilho) emitindo um elétron e um neutrino. O núcleo pai 99 Na Fig. 9-77, dois recipientes com açúcar estão ligados por uma estava em repouso na origem de um sistema de coordenadas *y.* corda que passa por una polia sem arito. A corda e a polia têm O elétron se afa

massa desprezível, a massa de cada recipiente é 500 g (incluindo o

Asta da origem com um momento linear (-1,2 X

10-22 kg · /s)i; o neurino se afasta da origem com momento açúcar), os centros dos recipientes estão separados por uma distânlinear (-6,4 X 10-23 kg · /s)}. Quais são (a) o módulo e (b) a cia de 50 mm e os recipienes são mantidos à mesma altura. Qual orientação do momento linear do núcleo ilho? (c) Seo núcleo ilho é a distância horizontal entre o cenro de massa do recipiente 1 e o tem uma massa de 5,8 X 10-6 kg, qual é sua energia cinética?

centro de massa do sistema de dois recipientes (a) inicialmente e (b)

91 Um homem de 75 kg, que esava em um carrinho de golfe de após 20 g de açúcar serem ransferidos do recipiente 1 para o reci39 kg que se movia a uma velocidade de 2,3 /s, pulou do carri piente 2? Após a ansferência e após os recipientes serem liberados nho com velocidade horizontal nula em relação ao chão. Qual foi a a partir do repouso, (c) em que sentido e (d) com que aceleração o variação da velocidade do cho, incluindo o sinal?

centro de massa se move?

92 Dois blocos de masss 1,0 kg e 3,0 kg estão ligados por uma mola

e repousam em uma superície sem arito. Os blocos começam a se

mover um em dirção ao ouro de modo que o bloco de 1,0 kg viaja

inicialmente a 1,7 /s em dição ao cenro de massa, que prmanece

em repouso. Qual é a velocidade inicial do ouro blco?

93 Uma locomotiva com uma massa de 3, 18 X 104 kg colide com

um vagão inicialmente em repouso. A locomotiva e o vagão permanecem juntos após a colisão e 27% da energia cinética inicial é I

2

ransferida para energia térmica, sons, vibrações *etc.* Determine a Figura 9-77 Problema 99.

massa do vagão.

94 Um velho Chrysler com 2400 kg de massa, que viaja em uma 100 Em um jogo de sinuca, a bola branca se choca com oura bola estrada retilínea a 80 h, é seguido por um Ford com 1600 kg de inicialmente em repouso. Após o choque, a bola branca se move massa a 60 kmh. Qual é

a velocidade do cenro de massa dos dois com uma velocidade escalar de 3,50 /s ao longo de uma rea que carros?

faz um ângulo de 22,0º com a direção do movimento da bola bran95 No aranjo da Fig. 9-21, a bola de sinuca 1, que se move a 2,2 ca antes do chque e a seunda bola tem una velocidade escalar

/s, sofre uma colisão oblíqua com a bola de sinuca 2, que esá ini de 2,00 ***s. Determine (a) o ângulo entre a direção do movimento cialmente em repouso. Após a colisão, a bola 2 se move com uma da seunda bola e a dirção do movimento da bola branca antes do velocidade escalar de 1,1*** **s e um ângulo }**

choque e (b) a velocidade escalar da bola branca antes do chque.

2 **= 60º. Quais são (a) o**

módulo e

(c) A energia cinética (dos centros de massa, não considere as rob) a orienação da velocidade da bola 1 após a colisão? (c) Os dados fonecidos mosram que a colisão é elástica ou inelástica? tações) é conservada?

96 Um foguete está se afastando do sistema solar com uma ve 101 Na Fig. 9-78, una caixa de sapatos de corida de 3,2 kg deslocidade de 6,0

liza em una mesa horizontal sem atrito e colide com una caixa de

X 103 /s. O motor do foguete é acionado e ejeta

produtos de combustão com uma velocidade de 3,0

sapatilhas de balé de 2,0 kg inicialmente em repouso na exremidade

X 103 /s em

relação ao foguete. A massa do foguete nesse momento é 4,0 X da mesa, a uma altura ***h*** **= 0,40 n do chão. A velocidade da caixa 104 kg e a**

aceleração é 2,0 /s2

de 3,2 kg é 3,0 /s imediatamente antes da colisão. Se as caixas

• (a) Qual é o empuxo do motor do

fo

grudam uma na outra por esarem fechadas com ita adesiva, qual

uete? (b) A que taxa, em quiloramas por segundo, os produtos

de combustão são ejetados?

é a energia cinética do conjunto imediatamente antes de atingir o

chão?

97 As rês bolas visas de cima na Fig. 9-76 são i

-

uais. As bolas 2

e 3 stão se tocando e alinhadas perpendicularmente à rajetória da

..

bola 1 . A velcidade da bola 1 tem módulo v0 = 1 O /s e está dirigida

'

para o ponto de conato das bolas 2 e 3. Após a colisão, quais são (a)

1

' '

o módulo e (b) a orienação da velocidade da bola 2, (c) o módulo e

h

' '

(d) a rientação da velocidade da bola 3 e (e) o módulo e () a orienl

'

ação da velocidade da bola 1? *(Sugesão:* sem atrito, cada impulso Figura 9-78 Problema 101.

PARTE 1

CENTRO DE MASSA E MOMENTO LINEAR

102 Na Fig. 9-79, um homem de 80 kg está em uma escada pendu elástica unidimensional com um objeto de massa *M* inicialmente em rada em um balão que possui uma massa total de 320 kg (incluindo repouso. Após a colisão, o objeto de massa *M* tem uma velocidade o passageiro na cesta). O balão está inicialmente em repouso em escalar

de 6,0 *mls* no sentido positivo do eixo *x*. Qual é o valor da relação ao solo. Se o homem na escada começa a subir a 2,5 /s massa M?

em relação à escada, (a) em que sentido e (b) com que velocidade 106 Um vagão aberto de 2140 kg, que pode se mover com atrito escalar o balão se move? (c) Se o homem para de subir, qual é a desprezível, esá parado ao lado de uma plaaforma. Um lutador de velocidade escalar do balão?

sumô de 242 kg corre a 5,3 /s pela plataforma (paralelamente aos

trilhos) e pula no vagão. Qual é a velocidade do vagão se o lutador

(a) para imediaamente, (b) continua a correr a 5,3 /s em relação

ao vagão, no mesmo sentido, e (c) faz meia volta e passa a correr a

5,3 /s em relação ao vagão no sentido oposto?

107 Um foguete de 6100 kg está preparado para ser lançado verticalmente a partir do solo. Se a velocidade de exaustão é 1200 /s, qual é a massa de gás que deve ser ejetada por segundo para que

o empuxo (a) seja igual ao módulo da força gravitacional que age

sobre o foguete e (b) proporcione ao foguete uma aceleração inicial

para cima de 21 /s2?

108 Um módulo de 500,0 kg está acoplado a uma nave de transporte de 400,0 kg que se move a 1000 /s em relação a uma nave-mãe em repouso. Uma pequena explosão faz o módulo se mover para

trás com uma velcidade de 100,0 /s em relação à nova velocidade

da nave de transporte. Qual é o aumento relativo da energia cinética

Figua 9-79 Problema 102.

do módulo e da nave de transporte em consequência da explosão,

do ponto de vista dos tripulantes da nave -mãe?

103 Na Fig. 9-80, o bloco 1, de massa m

109 (a) A que distância do centro da Terra se enconra o centro

1 = 6,6 kg, esá em repouso sobre uma mesa sem atrito que está encostada em uma parede. de massa do sistema Terra-Lua? (O Apêndice C fornece as massas O bloco 2, de massa *m*

da Terra e da Lua e a distância enre os dois asros .) (b) A que por

***2,* está posicionado enre o bloco 1 e a parede**

e desliza para a esquerda em direção ao bloco 1 com velocidade centagem do raio da Terra corresponde essa distância?

constante v *2;,* Determine o valor de m *2* para o qual os dois blocos se 1 10 Uma bola de 140 g com uma velocidade escalar de 7,8 /s se movem com a mesma velocidade após o bloco 2 colidir uma vez choca perpendicularmente com uma parede e ricocheteia no sencom o bloco 1 e uma vez com a parede. Suponha que as colisões tido oposto com a mesma velocidade escalar. O choque dura 3,80

são elásticas (a colisão com a parede não muda a velocidade escalar ms. Quais são os módulos (a) do impulso e (b) da força média que do bloco 2).

a bola exerce sobre a parede?

111 Um trenó-foguete com uma massa de 2900 kg se move a 250

/s sobre dois trilhos. Em um certo ponto, um tubo a bordo do renó

é mergulhado em um canal situado enre os rilhos e passa a ransferi r água para o tanque do renó, inicialmente vazio. Aplicando a lei de conservação do momento linear, determine a velocidade do

trenó depois que 920 kg de água são transferidos do canal para o

trenó. Inore o arito do tubo com a água do canal.

Figua 9-80 Problema 103.

1 12 Uma metralhadora de chumbinho dispara dez balas de 2,0 g

por segundo com uma velocidade escalar de 500 *mls.* As balas são

104 O roteiro de um ilme de ação requr que um pequeno caro de paradas por uma parede rígida. Determine (a) o módulo do momento corrida (com uma massa de 1500 kg e um comprimento de 3,0 m) de cada bala, (b) a energia cinética de cada bala e (c) o módulo da acelere ao longo de uma barcaça (com uma massa de 4000 kg e um força média exercida pelas balas sobre a parede. (d) Se cada bala comprimento de 14 m), de uma extremidade a outra da embarcação, permanece em contato com a parede apenas por 0,60 ms, qual é o e salte para um cais um pouco mais abaixo. Você é o consultor téc módulo da força média exercida por uma bala sobre a parede? (e) nico do lme. No momento em que o carro entra em movimento, o Por que a força média é tão diferente da força média calculada em barco esá encostado no cais, como na Fig. 9-81; o barco pode des (c)?

lizar na água sem resistência signicaiva; a distribuição de massa 1 13 Um vagão de rem se move sob uma esteira transportadora de do carro e da barcaça pode ser considerada homogênea. Calcule grãos com uma velocidade escalar de 3,20 /s. Os grãos caem no qual será a distância entre o barco e o cais no instante do salto.

vagão a uma taxa de 540 kg/min. Qual é o módulo da força necessária para manter o vagão em movimento com velocidade constante se o atrito é desprezível?

Figua 9-81 Problema 104.

114 A Fig. 9-82 mostra uma placa quadrada uniforme de lado

***6d* = 6,0 m da qual um pedaço quadrado de lado 2d foi retirado.**

105 Um objeto de 3,0 kg, que se move com uma velocidade esca Quais são (a) a coordenada *x* e (b) a coordenada y do centro de lar de 8,0 /s no sentido positivo de um eixo x, sofre uma colisão massa da parte restante?

T

y

altura é alcançada (c) pela esfera 1 e (d) pela esfera 2? *(Sugestão:*

não use valores arredondados.)

3d

119 Na Fig. 9-83, o bloco 1 desliza ao longo de um eixo *x* em um

piso sem atrito com uma velocidade de 0,75 m/s até sofrer uma colisão elástica com o bloco 2, inicialmente em repouso. A tabela a seguir mosra a massa e comprimento dos blocos (homogêneos) e a

3d

posição do cenro dos blocos no insante *t* = O. Determine a posição

L

do centro de massa do sistema de dois blocos (a) em *t* = O, (b) no

-

A

A

so, e uma força F *2* = (2,00i - 4,00j)N age sobre uma partícula de

massa 4,00 X 10-3 kg, também inicialmente em repouso. Do instante

***t* = O ao instante *t* = 2,00 ms, quais são (a) o módulo e b) o ângulo Io**

(em relação ao semieixo *x* positivo) do deslocamento do centro de

massa do sistema das duas parículas? (c) Qual é a energia cinéica

-1,50 m

o

do centro de massa em *t* = 2,00 msl

Figura 9-83 Problema 119.

116 Duas partículas, *P* e *Q*, são liberadas a partir do epouso a 1,0

m de distância uma da oura. A partícula *P* tem uma massa de O, 1 O 120 Um corpo está se movendo com uma velocidade escalar de kg e a partícula *Q* tem uma massa de 0,30 kg. *P* e *Q* se araem com 2,0 m/s no sentido positivo de um eixo *x;* nenhuma força age sobre uma força constante de 1,0 X 10-2 N. Nenhuma força extena age o corpo. Uma explosão intena separa o corpo em duas partes, amsobre o sistema. (a) Qual é a velocidade do centro de massa de *P* e bas de 4,0 kg, e aumenta a energia cinética total em 16 J. A parte

***Q* quando a distância entre as partículas é 0,50 *ml* (b) A que dis da rente continua a se mover na mesma direção e sentido que o tância da posição inicial de *P* as partículas colidem?**

corpo original. Qual é a velocidade escalar (a) da parte de rás e (b)

117 Uma colisão ocorre entre um corpo de 2,00 kg que se move da parte da frente do corpo?

A

A

com uma velocidade v = (-4,00 m/s)i + (-5,00 m/s)j e um corpo 121 Um eléron sore uma colisão elástica unidimensional com um *1*

A

de 4,00 kg que se move com uma velocidade v *2* = (6,00 m/s)i + átomo de hidrogênio inicialmente em repouso. Que porcenagem da A

(-2,00 m/s)j Os dois corpos permanecem unidos após a colisão. energia cinética inicial do eléron é ransferida para a energia ciné

Determine a velocidade comum dos dois corpos após a colisão (a) tica do átomo de hidrogênio? (A massa do átomo de hidrogênio é em termos dos vetores unitários e como (b) um módulo e (c) um 1840 vezes maior que a massa do eléron.) ângulo.

122 Um homem (com 915 N de peso) esá em pé em um vagão

118 No aranjo das duas esferas da Fig. 9-20, suponha que a esfera de trem (com 2415 N de peso) enquanto este se move a 18,2 m/s 1 tem uma massa de *50* g e uma altura inicial *h1* = 9,0 cm e que a no sentido positivo de um eixo *x*, com atrito desprezível. O homem esfera 2 tem uma massa de 85 g. Depois que a esfera 1 é liberada e começa a correr no sentido negativo do eixo *x* com uma velocidacolide elasicamente com a esfera 2, que altura é alcançada (a) pela de escalar de 4,00 m/s em relação ao vagão. Qual é o aumento da esfera 1 e b) pela esfera 2? Após a colisão (elásica) seguinte, que velocidade do vagão?

ROTAÇÃO

10

CA P Í T U LO

- O QU E É FÍSICA?

Como vimos em capítulos anteriores, um dos objeivos principais da física

é esudar movimentos. Até agora, examinamos apenas os movimentos de tnslação,

nos quais objetos se movem ao longo de linhas retas ou curvas, como na Fig. 10-1 *a*.

V amos agora considerar os movimentos de roação, nos quais os objetos giram em

tomo de um eixo, como na Fig. 10-lb.

Observamos rotações em quase todas as máquinas; produzimos rotações toda

vez que abrimos uma tampa de rosca; pagamos para experimentar rotações quando

vamos a um parque de diversões. A rotação é o segredo de jogadas de sucesso em

muitos esportes, como dar uma longa tacada no golfe (a bola precisa estar girando

para se manter no ar durante mais tempo) ou chutar com efeito no futebol (a bola

precisa girar para que o ar a empurre para a esquerda ou para a direita). A rotação

também é importante em questões mais sérias, como a fadiga das peças metálicas

dos aviões.

Começamos nossa discussão da rotação deinindo as variáveis do movimento,

como fizemos para a translação no Capítulo 2. Como vamos ver, as variáveis da rotação são análogas às do movimento unidimensional e,

como no Capítulo 2, uma situação especial importante é aquela na qual a aceleração (neste caso, a acelera

ção angular) é constante. Vamos ver também que é possível escrever uma equação

equivalente à segunda lei de Newton para o movimento de rotação, usando uma

randeza chamada *toque* no lugar da força. O teorema do rabalho e enrgia cinética também pode ser aplicado ao movimento de roação, com a massa subsituída *(a)* por uma grandeza chamada *momento de inécia.* Na verdade, grande parte do que

discuimos até agora pode ser aplicado ao movimento de roação com, talvez, pequenas modiicações.

1 0-2 As Variáveis da Rotação

Neste capítulo, vamos estudar a roação de um corpo rígido em tomo de um eixo

fixo. Um corpo rgido é um corpo que gira com todas as partes ligadas entre si e

sem mudar de forma. Um eixo fixo é um eixo que não muda de posição. Isso significa que não examinaremos um objeto como o Sol, pois as partes do Sol (uma bola de gás) não estão ligadas enre si. Também não examinaremos um objeto como uma

bola de boliche rolando em uma pisa, já que a bola gira em torno de um eixo que

muda constantemente de posição (o movimento da bola é uma mistura de rotação

e ranslação).

A Fig. 10-2 mostra um corpo rígido de forma arbirária girando em torno de

um eixo ixo, chamado de eixo de roação. Em uma rotação pura ***(movimento angular),*** **todos os pontos do corpo se movem ao longo de circunferências cujo centro** ***(b)*** **está sobre o eixo de rotação e todos os pontos descrvem o mesmo ângulo no mes Figua 10-1 A patinadora Sasha mo intervalo de tempo. Na ranslação pura** ***(movimento linear),*** **todos os pontos se Cohen em um movimento** ***(a)*** **de movem ao longo de linhas retas e todos os pontos percorem a mesma distância no anslação pura em uma direção ixa e** ***(b)*** **de rotação pura em torno**

mesmo intervalo de tempo.

de um eixo verical. ***(a: Mike***

Vamos discutir agora (um de cada vez) os equivalentes angulares das grandezas ***SegarReutersLandov LC; b:*** **lineares posição, deslocamento, velocidade e aceleração.**

Elsa/Getty Images, Inc.)

,

com o corpo e é

rotação e girando com o corpo. A posição angular da reta é o ângulo que faz com

perpendicular ao uma direção ixa, que tomamos como a posição angular zero. Na Fig. 10-3, a poeixo de rotação.

sição angular *J* é medida em relação ao semieixo *x* posiivo. De acordo com a geo

Reta d e referência

metria, *J* é dado por

s

***I* = -**

,. (ângulo cm adinnos).

(10-1)

onde *s* é comprimento de um arco de circunferência que vai do eixo *x* (posição an

Figura 10-2 Um corpo rígido de forma gular zero) até a reta de referência e *r* é o raio da circunferência.

arbirária em rotação pura em tomo do

Um ângulo deinido desta forma é medido em radianos (rad) e não em revoluções

eixo z de um sistema de coordenadas. A (rev) ou em graus. Como é a razão enre dois comprimentos, o radiano é um número posição da *reta de referência* em relação puro, ou seja, não tem dimensão. Como o

comprimento de uma circunferência de ao corpo rígido é arbitrária, mas a rea

raio r é 21rr, uma circunferência completa equivale a 27T radianos:

é perpendicular ao eixo de roação e

mantém sempre a mesma posição em

2rr

1 rev = 360º =

= 2T rad,

(10-2)

relação ao corpo, girando com ele.

,.

e, portnto,

1 rad = 57,3º = 0,159 rev.

(10-3)

Nós *não* reajustamos *J* para zero a cada volta completa da reta de referência. Se a reta de referência completa duas revoluções a parir da posição angular zero, a posição angular da reta é *J* = 41r rad.

No caso da translação pura de uma partícula ao longo de um eixo *x*, o movimento da partícula é totalmente descrito por uma função *x(t)*, a posição da partícula em função do tempo. Analogamente, no caso da rotação pura de um corpo rígido, o

movimento da parícula é totalmente descrito por uma função *8(t)*, a posição angular

da reta de referência do corpo em função do tempo.

Deslocamento Angular

Se o corpo da Fig. 10-3 gira em tomo do eixo de rotação como na Fig. 10-4, com a

O corpo girou de um

posição angular da reta de referência variando de

ângulo e no sentido

***J* I para 82, o corpo sofre um des**

***antihorário.* Este é o locamento angular *.J* dado por**

***y* sentido *positivo* de**

(10-4)

rotação.

Esta defmição de deslocamento angular é válida, não só para o corpo rígido como

um todo, mas ambém para *toas as partículas do corpo.*

Se um corpo está em movimento de ranslação ao longo de um eixo *x,* o deslo

s

camento x pode ser posiivo ou negativo, dependendo de se o movimento ocore no

senido posiivo ou negaivo do eixo. Da mesma forma, o deslocamento angular *.J* de

um corpo em rotação pode ser posiivo ou negaivo, de acordo com a seguinte rera:

Eixo de

rotação

Um deslocamento angular no sentido antihorário é positivo e um deslocamento

Este ponto significa que

angular no sentido horário é negativo.

o eixo de rotação aponta

para fora do papel.

A frase *''os relógios são negativos"* pode ajudá-lo a memorizar esta regra (os reló

Figura 10-3 Seção transversal do

gios certamente são negativos quando tocam de manhã cedo).

corpo rígido em rotação da Fig. 10-2,

visto de cima. O plano da seção

'TESTE 1

ransversal é perpendicular ao eixo de

Um disco pode girar em tomo de um eixo cenral como se fosse um carrossel. Quais dos

rotação, que agora está perpendicular ao

seguintes pares de valores para as posições inicial e l, respecivamente, correspondem

plano do papel, saindo do papel. Nesta

a um deslocamento angular negativo: (a) -3 rad,

posição do corpo, a reta de referência

+5 rad, (b) -3 rad, -7 rad, (e) 7 rad,

-3 rad?

faz um ângulo J com o eixo *x*.

$$\omega_{méd} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$

Velocidade Angular

'

Reta de referência

Suponha que um corpo em rotação está na posição angular 81 no instante t e na po1

Esta variação

sição angular 8

do ângulo é o

***2* no instante *t2,* como na Fig. 10-4. Definimos a velocidade angular média do corpo no intervalo de tempo *Ât* de t**

deslocamento

1 a t2 como

deslocamento angular que acontece

Se conhecemos *8(t)*, podemos calcular a velocidade angular *w* por derivação.

no intervalo lt (= *t*

As Eqs. 10-5 e 10-6 valem não só para o corpo rígido como um todo, mas tam

***2* -t1). O corpo**

propriamente dito não aparece na igura.

bém para *tods as partículas do corpo*, uma vez que as distâncias relativas são mantidas ixas. As unidades de velocidade angular mais usadas são o radiano por segundo (rad/s) e a revolução por segundo (revis). Oura medida de velocidade angular foi

usada durante muitos anos pela indúsria fonoráfica: a música era reproduzida em

discos de vinil que giravam a "33t rpm" ou "45 rpm", o que significava 33t rev/min ou 45 rev/min.

Se uma partícula se move em ranslação ao longo de um eixo *x*, a velocidade

linear *v* da partícula pode ser posiiva ou negativa, dependendo de se a parícula

está se deslocando no sentido positivo ou negativo do eixo. Analogamente, a velocidade angular w de um corpo rígido em rotação pode ser positiva ou negaiva, dependendo de se o corpo está girando no sentido antihorário (posiivo) ou horário

(negativo). ("Os relógios são negativos" também funciona neste caso.) O módulo

da velocidade angular é chamado de velocidade angular escalar e também é representado por w.

Aceleração Angular

Se a velocidade angular de um corpo em rotação não é constante, o corpo possui

uma aceleração angular. Sejam w *2* e w1 as velocidades angulares nos instantes *t2* e t1, respectivamente. A aceleração angular média do corpo em roação no intervalo

de t1 a *t* é defmida aravés da equação

2

***Wz* - úJJ**

iw

ªméd = *l*

{10-7)

i - ti

Ât '

onde Âw é a variação da velocidade angular no intervalo *Ât.*

A aceleração angular (instantânea) *a*, na qual estaremos mais interessados, é

o limite dessa randeza quando *lt* tende a zero:

. lw

dw

***a* = hn,**

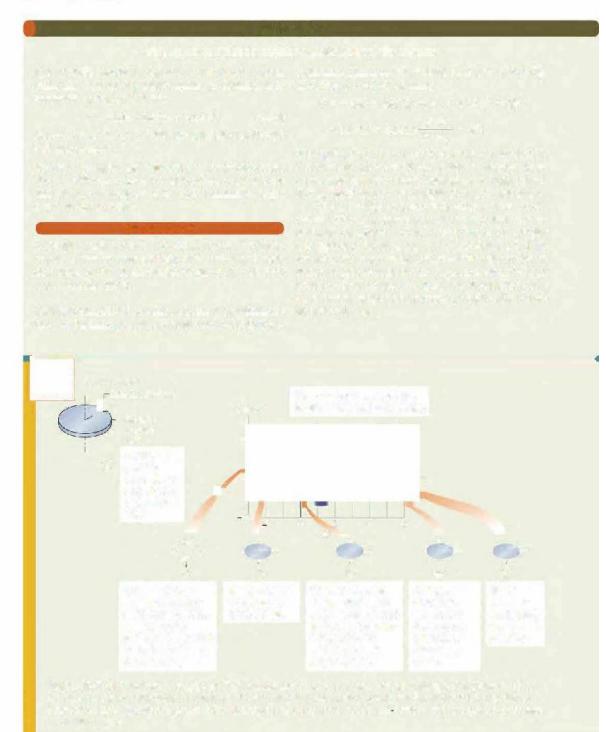
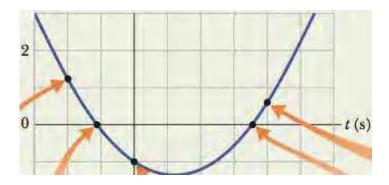
=

–

[illegible] lt**

t

(10-8)

As Eqs.10-7 e 10-8 também são válidas para *toas as partículas do corpo*. As unidades de aceleração mais usadas são o radiano por segundo ao quadrado (rad/s2) e a revolução por segundo ao quadrado (rev/s2).

Exemplo

Cálculo da velocidade angular a partir da posição angular

O disco da Fig. 10-5a está girando em torno do eixo cenral se instante. Para isso, subsituímos *t* por seu valor na Eq.

como um carrossel. A posição angular *O(t)* de uma reta de 10-9. Para *t* = -2,0 s, obtemos referência do disco é dada por

6 = -1,00 - (0,60)(-2,0) + (0,250)(-2,0)1

J = -1,00 - *0,600t* + 0,250t2,

(10-9)

360º

o

com *t* em segundos, *J* em radianos e a posição angular zero

= 1,2 rad = 1,2 rad 2 d = 6

.ra

9 .

indicada na figura.

Isso significa que em *t* = -2,0 s a reta de referência está

(a) Plote a posição angular do disco em função do tempo, deslocada de 1,2 rad = 69° no sentido ani-horário (porde *t* = -3,0 s a *t* = 5,4 s. Desenhe o disco e a reta de re que *J* é positivo) em relação à posição zero. O desenho 1

ferência em *t* = -2,0 s, O s, 4,0 s e nos instantes em que da Fig. *l0-5b* mosra esta posição da reta de referência.

o gráfico cruza o eixo *t.*

Da mesma forma, para *t* = O, obtemos *J* = -1,00

rad = -57°, o que signiica que a reta de referência está

IDEIA-CHAVE

deslocada de 1,0 rad = 57° no senido horário em relação

A posição angular do disco é a posição angular *O(t)* da à posição angular zero, como mosra o desenho 3. Para reta de referência, dada pela Eq. 10-9 como uma função *t* = 4,0 s, obtemos *J* = 0,60 rad = 34° (desenho 5). Fazer do tempo *t.* Assim, devemos plotar a Eq. 10-9; o resultado desenhos para os instantes em que a curva cruza o eixo *t* aparece na Fig. *l0-5b.*

é fácil, pois nesse caso *J* = O e a reta de referência está

momentaneamente alinhada com a posição angular zero

***Cálculos* Para desenhar o disco e a reta de referência em (desenhos 2 e 4).**

um certo insante, precisamos determinar o valor de *J* nes-

!Eixo de rotação

'

Reta de referência

Este é um gráfico do ângulo

9(ad)

do disco em função do tempo.

-· Posição

anular

zero

A posição

(a)

angular

do disco é o

ângulo entre

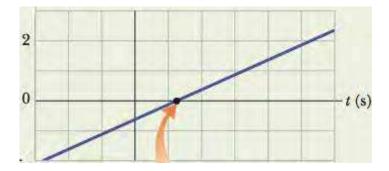
essas duas

retas.

positivo de J.

negativo de J.

J = O.

Figura 10-5 (a) Um disco em roação. (b) Grfico da posição angulr do disco em função do tempo, J(t). Cinco desenhos indicam a posição angular da reta de referência do disco para cinco pontos da curva. (e) Gráfico da velocidade angulr em função do tempo, w(t). Vlores positivos de w correspondem a rotações no senido antihorário; valores negativos, a rotações no sentido horário.

PARTE 1

ROTAÇÃO

23

(b) Em que instante tnín o ângulo O(t) passa pelo valor Este *mnimo* de *O(t)* (o ponto mais baixo da curva da Fig.

mínimo mostrado na Fig. *l0-5b?* Qual é esse valor mí 10-Sb) corresponde à *mxima rotação no sentido hoário* nimo?

do disco a partir da posição angular zero, uma rotação um

pouco maior que a representada no desenho 3.

IDEIA-CHAVE

(c) Plote a velocidade angular w do disco em função do

Para determinar o valor exremo (o mínimo, neste caso) tempo de *t*

de uma função, calculamos a derivada primeira da função

= -3,0 s a *t* = 6,0 s. Desenhe o disco e indique o senido de rotação e o sinal de *w* em *t* e igualamos o resulado a zero.

= -2,0 s,

4,0 s e tmín•

Cálculos **A derivada primeira de *O(t)* é**

IDEIA-CHAVE

dO

De acordo com a Eq. 10-6, a velocidade angular w é igual

J **= -0,600 +** ***0,5001.***

ui

(10-10) a *dO/dt,* dada pela Eq. 10-10. Temos, portanto,

Igualando este resulado a zero e explicitando *t,* determi

w **= -0,600 +** ***0,500t.***

(10-11)

namos o instante em que *O(t)* é mínimo:

O gráico da função w(t) aparece na Fig. 10-Sc.

t,nín = 1,20 S.

(Resposta)

Para obter o valor mínimo de O, subsituímos t

Cálculos **Para desenhar o disco em *t* = -2,0 s, subsituí**

n na Eq.

10-9, o que nos dá

mos este valor de *t* na Eq. 10-11, obtendo

O = -1,36 rad = -77,9º.

(Resposta)

<u = -1,6 ra/s.

(Resposta)

O sinal negativo mostra que em t = -2,0 s o disco está

girando no sentido horário (desenho da esquerda da Fig.

10-Sc).

Este é um gráfico da velocidade

Fazendo t = 4,0 s naEq. 10-11, obtemos

o (rad/s) angular do disco em função do tempo.

w = 1,4 rad/s.

(Resposta)

O sinal posiivo implícito mosra que em t = 4,0 s o disco

está girando no senido antihorário (desenho da direita

da Fig. 10-Sc).

Já sabemos que dO/dt = O para t = tnún· Isso signiica

que neste ponto w = O, ou seja, o disco para momentane

- 2

amente quando a rea de referência ainge o valor mínimo

- 2

negativa, diminui em módulo até

se anular momentaneamente

***Descião* Quando observamos o disco pela primeira vez,**

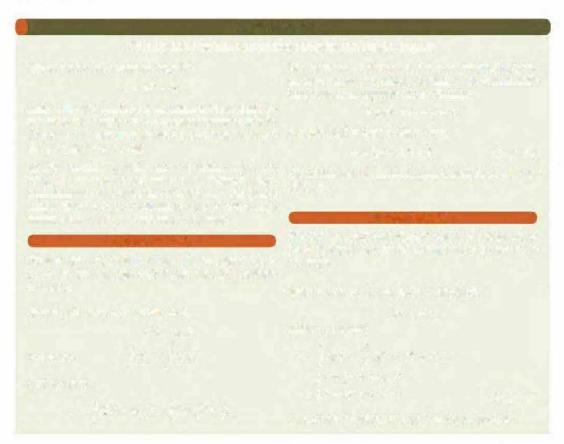
e passa a aumentar

em *t* = -3,0 s, o disco tem uma posição angular positiva

indefinidamente.

e está irando no sentido horário, com velocidade cada

vez menor. Depois de parar momentaneamente na posição angular O = -1,36 rad, o disco começa a irar no sentido antihorário e o valor de O aumenta até se tomar

novamente positivo.

Exemplo

Cálculo da velocidade angular a partir da aceleração angular

Um pião gira com aceleração angular

Para calcular o valor da constante de integração C, oba

servamos que *w* = 5 rad/s no instante *t* = O. Substituindo

= *5t3* - 4t,

esses valores na expressão de w, obtemos:

onde *t* está em segundos e *a* em radianos por segundo ao

5 rad/s = O - O + e·,

quadrado. No instante *t* = O, a velocidade angular do pião

é *5* rad/s e uma reta de referência traçada no pião está na e, portanto, C = 5 rad/s. Nesse caso, posição angular *J* = 2 rad.

w = *it4* - 2t2 + 5.

(Resposta)

(a) Obtenha uma expressão para a velocidade angular do

pião, *w(t),* ou seja, escreva uma expressão que descreva (b) Obtenha uma expressão para a posição angular do explicitamente a variação da velocidade angular com o pião, *J(t).*

tempo. (Sabemos que a velocidade angular *varia* com o

tempo, já que existe uma aceleração angular.)

IDEIA-CHAVE

IDEIA-CHAVE

Por deinição, *w(t)* é a derivada de *O(t)* em relação ao tempo. Assim, podemos obter *O(t)* integrando *w(t)* em relação Por definição, *a(t)* é a derivada de *w(t)* em relação ao tem ao tempo.

po. Assim, podemos obter *w(t)* integrando *a(t)* em relação

ao tempo.

Cálculos Como, de acordo com a Eq. 10-6,

Cálculos De acordo com a Eq. 10-8,

d8 = Jdl,

dw = a di,

podemos escrever

J J

J J

e, portanto,

dJ = ! dt.

8 = J dt = [illegible] - 21 *2* + 5) de

Assim, temos:

= 1, 5 -

4

.*t3*

3 + St + C'

J

= [illegible] - [illegible] + *5l* + 2,

(R!sposta)

) = (5t3 - *4t) dr* = [illegible] - ;t2 + e.

onde C' foi calculado para que *J* = 2 rad em *t* = O.

1 0-3 As Grandezas Angulares São Vetores?

A posição, velocidade e aceleração de uma partícula são normalmente expressas através de vetores. Quando uma partícula se move em linha reta, orém, não é necessário usar a notação vetorial. Nessas condições, a partícula pode se mover apenas em dois

sentidos, que podemos indicar usando os sinais posiivo e negativo.

Da mesma forma, um corpo rígido em roação em tomo de um eixo ixo só pode

girar nos senidos horário e antihorário e podemos indicar esses senidos usando os

sinais positivo e negaivo. A questão que se levanta é a seguinte: "No caso mais geral, podemos expressar o deslocamento, a velocidade e a aceleração angular de um corpo rígido em rotação aravés de vetores?" A resposta é um "sim" cauteloso (veja a ressalva a seguir, em relação aos deslocamentos angulares).

Considere a velocidade angular. A Fig. 10-6a mostra um disco de vinil girando em um toca-discos. O disco tem uma velocidade angular escalar constante *w* (=

33t rev/in) no sentido horário. Podemos representar a velocidade angular do disco como um vetor *w* apontando ao longo do eixo de

roação, como na Fig. 10-6b.

A regra é a seguinte: escolhemos o comprimento do vetor de acordo com uma escala conveniente, como, por exemplo, 1 cm para cada 10 rev/in. Em seguida, determinamos o sentido do vetor *w* usando a regra da mão direita, como mosra a Fig. 10-6c. Evolva o disco com a mão direita, com os dedos apontando *no sentido*

***de otação;* o polegar estendido mosra o sentido do vetor velocidade angular. Se o**

$\vec{\omega}$

y

x

y

FÍSICA
x

x

y
x

ura. (e) Estabelecemos o

sentido do vetor velocidade angular

w

como para baixo pela regra da mão

direita. Quando os dedos da mão direita

O sentido do vetor

envolvem o disco e apontam no sentido

velocidade angular

do movimento, o polegar estendido

é dado pela regra *(a)*

mosra o senido de w.

da mão direita.

(b)

(e)

disco esivesse girando no sentido oposto, a regra da mão direita indicaria o sentido

oposto para o vetor velocidade angular.

A representação de grandezas angulares por meio de vetores não é tão fácil de

compreender como a representação de grandezas lineares. Insinivamente, esperamos

que algo se mova *na direção* do vetor. Não é o que acontece. Em vez disso, temos

algo (o corpo rígido) que gira *em torno* da direção do vetor. No mundo das rotações

puras, um vetor deine um eixo de rotação, não uma direção de movimento. Enretanto, o vetor deine também o movimento. Além disso, obedece a todas as reras de manipulação de vetores que foram discutidas no Capítulo 3. A aceleração angular ã

é outro vetor que obedece às mesmas regras.

Neste capítulo consideramos apenas rotações em torno de um eixo ixo. Nesse

caso, não precisamos rabalhar com vetores; podemos representar a velocidade angular aravés de um escalar *w*, a aceleração angular através de um escalar *a* e usar o sinal posiivo para indicar o sentido ani-horário e o sinal negaivo para indicar o

y

senido horário.

Vamos agora à ressalva: os *deslocamentos* angulares (a menos que sejam muito

pequenos) *não podem* ser ratados como vetores. Por que não? Podemos certamente

X

aribuir aos deslocamentos angulares um módulo e uma orientação, como fizemos

para a velocidade angular na Fig. 10-6. Enretanto, para ser representada como um z

z

O resultado

vetor, uma grandeza ambém *precisa* obedecer às regras da soma vetorial, uma das

depende da

quais diz que, quando somamos dois vetores, a ordem na qual os vetores são somaordem das

rotações.

dos é irrelevante. O deslocamento angular não passa neste teste.

A Fig. 10-7 mostra um exemplo. Um livro inicialmente na horizontal sore

duas rotações de 90°, primeiro na ordem da Fig. 10-7a e depois na ordem da Fig.

1 O-7 *b*. Embora os dois deslocamentos angulaes sejam iguais nos dois casos, a ordem é diferente e o livro termina com orientações diferentes. Eis outro exemplo: deixe o z

z

braço direito pender ao longo do corpo, com a palma da mão voltada para a dentro.

Sem girar o pulso, (1) levante o braço para a rente até que ique na horizontal, (2)

mova o braço horizonlmente até que aponte para a direita e (3) deixe-o pender ao

longo do corpo. A palma da mão ficará volada para a frente. Se você repetir a ma

oiSJCA

nobra, mas inverter a ordem dos movimentos, qual será a orientação inal da palma

***1**-x*

da mão? Esses exemplos mostram que a soma de dois deslocamentos angulares depende da ordem desses deslocamentos e, portanto, os deslocamentos angulares não z podem ser vetores.

;:

(a)

(b)

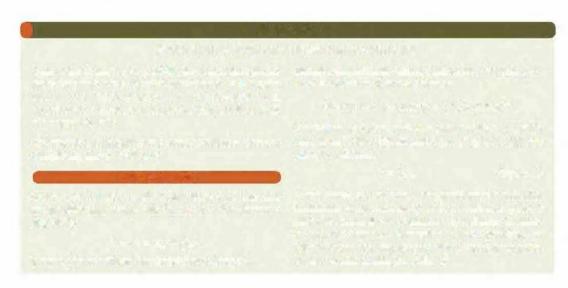
Figua 10-7 *(a)* A partir da posição

1 0-4 Rotação com Aceleração Angular Constante

inicial, no alto, o livro sofre duas

roações sucessivas de 90º, primeiro em

Nas translações puras, os movimentos com *aceleração linear constante* (como, por tono do eixo *x* (horizontal) e depois em exemplo, o movimento de um corpo em queda livre) consituem um caso especial tono do eixo *y* (vertical). *(b)* O livro importante. Na Tabela 2-1, apresentamos uma série de equações que são válidas sofre as mesmas rotações, na ordem apenas para este tipo de movimento.

mversa.

Nas rotações puras, o caso da *aceleração angular costante* também é importante

e pode ser descrito usando um conjunto análogo de equações. Não vamos demonsrá-las, mas nos limitaremos a escrevê-las a parir das equações lineares correspondentes, subsituindo as randezas lineares pelas grandezas angulares equivalentes.

O resulado aparece na Tabela 10-1, que mosra os dois conjuntos de equações (Eqs.

2-11 e 2-15 a 2-18; 10-12 a 10-16).

Como vimos, as Eqs. 2-11 e 2-15 são as equações básicas para o caso da aceleração linear constante; as outras equações da lista "Translações'' podem ser deduzidas a parir dessas equações. Da mesma forma, as Eqs. 10-12 e 10-13 são as equações básicas para o caso da aceleração angular constante e as outras equações

da lista "Rotações" podem ser deduzidas a parir dessas equações. Para resolver um

problema simples envolvendo aceleração angular constante, quase sempre é possível usar uma das cinco equações da lista "Rotações". Escolha uma equação para a qual a única incógnita seja a variável pedida no problema. Um plano melhor é memorizar apenas as Eqs. 10-12 e 10-13 e resolvê-las como um sistema de equações

, .

sempre que necessano.

ITESTE 2

Em quatro situações um corpo em rotação tem a posição angular *8(t)* dada por (a) *8* =

3t - 4, (b) } = -St3 + *4t2* + 6, (e) } = *1t2* - *4/t* e *(d)}* = *St2* - 3. A quais dessas situa

ções as equações angulares da Tabela 10-1 se aplicam?

Tabela 10-1

Equações de Movimento paa Aceleração Linear Constante e Aceleração Angular Constante

Número da

quação

Variável

Equação

Número da

Equação

Linear

Ausente

Angular

Equação

(2-11)

v* - *v

***)* - º**

0 + *ai*

o + V *)t*

o* - ºº = !Cii + *w)t

(10-15)

(2-18)

x - x0 = vt - }at2

Vu

\)

} - 00 = wt - !at2

(J0-16)

Exemplo

Pedra de amolar com aceleraão angular constante

Uma pedra de amolar (Fig. 10-8) gira com aceleração an *Cáos* Substituindo valores conhecidos e fazendo 0 *0* =

gular constante *a* = 0,35 rad/s2• No instante *t* = O, a pedra O e } = 5,0 rev = 101r rad, obtemos tem uma velocidade angular w *0* = -4,6 rad/s e uma reta

**de referência raçada na pedra está na horizontal, na posil01rrad = (-4,6 rad/s)t + [illegible]

ção angular 0 *0* = O.

(Convertemos 5,0 rev para *101r* para manter a coerência

(a) Em que instante após *t* = O a reta de rerência esá na enre as unidades.) Resolvendo esta equação do segundo posição angular } = 5,0 rev?

grau em *t*, obtemos

IDEIA-CHAVE

1 = 32 s.

(Resposta)

Como a aeleração angular é constante, podemos usar A esta altura, notamos um fato aparentemente esranho.

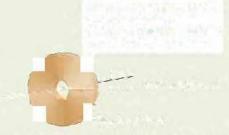
as equações para rotações da Tabela 10-1. Escolhemos a Inicialmente, a pedra esava girando no senido negaivo e Eq. 10-13,

pariu da orientação } = O. Enretanto, acabamos de calcular que, 32 s depois, a orientação da pedra é posiiva, } =

***} - Oo = ot* + 4ar2,**

5,0 rev. O que aconteceu nesse intervalo para que a pedra

porque a única variável desconhecida é o tempo *t.*

assumisse uma orientação positiva?

(b) Descreva a rotação da pedra de amolar entre *t* = O e

Medimos as rotações usando

***t* = 32 s.**

a reta de referência.

Sentido antihorário = positivo

***Descião* A pedra está inicialmente girando no senido**

Sentido horário = negativo

negaivo (o sentido dos ponteiros do relógio) com velocidade angular w *0* = -4,6 rad, mas a aceleração angular a é positiva (o senido contrário ao dos ponteiros do re

,i.O

lógio). Esa oposição inicial enre os sinais da velocida

[illegible] *1* ______ Posição anular zero**

de angular inicial e da aceleração angular significa que a

roda gira cada vez mais devagar no sentido negaivo, para

Reta de referência

momentaneamente e, em seguida, passa a girar no senido

posiivo. Depois que reta de referência passa de volta pela Figura 10-8 Uma pedra de amolar. No instante *t* = O, a reta posição inicial J = O, a pedra de amolar dá mais 5 voltas de refeência (que imaginamos marcada na pedra) está na completas até o instante *t* = 32 s.

horizontal.

(c) Em que instante t a pedra de amolar para momentaneamente?

vel w, para que possamos igualá-la a O e calcular o valor

***Cálculo* V amos consultar de novo a tabela de equações correspondente de *t.* Assim, escolhemos a Eq. 10-12, que para aceleração angular constante. Mais uma vez, preci nos dá**

samos de uma equação que contenha apenas a incógnita

***w* - %**

O - (-4,6 rad/s)

***t.* Agora, porém, a equação deve conter também a variá- *t* =- -**

a

0,35 rad/s2

= 1.3 s. (Resposta)

Exemplo

Rotor com aceleração angular constante

Você está operando um Rotor (um brinquedo de parque

w - o

de diversões com um cilindro giratório vertical), percebe

! = -

--

que um ocupante está ficando tonto e reduz a velocidade

angular do cilindro de 3,40 rad/s para 2,00 rad/s em 20,0 que substituímos na Eq. 10-13 para obter (w-o) (w-Q)

rev, com aceleração angular constante.

2

8 - o = o

(a) Qual é a aceleração angular constante durante esta re

a

+ *!a*

a

dução da velocidade angular?

Explicitando a, subsituindo os valores conhecidos e convertendo 20 rev para 125,7 rad, obtemos IDEIA-CHAVE

Como a aceleração angular do cilindro é constante, pode

w2 - w5

a =

= (2,00 rad/s)2 - (3,40 rad/s)2

mos relacioná-la à velocidade angular e ao deslocamento

2(e - eo)

2(125,7 rad)

angular aravés das equações básicas da aceleração angular

= -0,0301 rad/s2.

(Resposta)

constante Eqs. 10-12 e 10-13).

(b) Em quanto tempo ocorre a redução de velocidade?

Cálculos A velocidade angular inicial é w *0* = 3,40 rad/s, o

deslocamento angular é O - 0

Cálculo Agora que conhecemos a, podemos usar a q.

0 = 20,0 rev e a velocidade

angular no final do deslocamento é w = 2,00 rad/s. Entre 10-12 para obter t:

tanto, não conhecemos a aceleração angular a e o tempo

w - o 2.00 ral/s - 3,40 ra<l/s

t, que aparecem nas duas equações básicas.

(= [illegible]

a

-0,0301 rad/s2

Para eliminar a variável *t*, usamos a Eq. 10-12 para

= 46,5 s.

(Resposta)

escrever

10-5 Relações entre as Variáveis Lineares e Angulares

Na Seção 4-7, discutimos o movimento circular uniforme, no qual uma parícula

se move com velocidade linear escalar v consante ao longo de uma circunferência.

Quando um corpo rígido, como um carrossel, gira em tono de um eixo, cada parícula descreve uma circunferência em tono do eixo. Como o corpo é rígido, todas as parículas completam uma revolução no mesmo intervalo de tempo, ou seja, todas

têm a mesma velocidade angular w.

Por ouro lado, quanto mais afastada do eixo está a partícula, maior é a circunferência que a parícula percorre e, portanto, maior é a velocidade linear escalar *v.*

Você pode perceber isso em um carrossel. Você gira com a mesma velocidade angular w independentemente da distância a que se enconra do centro, mas sua velocidade linear escalar v aumenta percepivelmente quando você se afasta do cenro do carrossel.

Frequentemente, precisamos relacionar as variáveis lineares *s, v,* e *a* de um ponto particular de um corpo em roação às variáveis angulares O, w e a do corpo. Os dois

conjuntos de variáveis estão relacionados aravés de r, a *distância perpendicular* do

ponto ao eixo de rotação. Esta distância perpendicular é a distância entre o ponto e

o eixo de roação, medida sobre uma perpendicular ao eixo. E também o raio *r* da

circunferência descria pelo ponto em tono do eixo de rotação.

A Posição

Se uma reta de referência de um corpo rígido gira de um ângulo O, um ponto do

corpo a uma distância r do eixo de rotação descreve um arco de circunferência de

comprimento s, onde s é dado pela Eq. 10-1:

***s = 8r* (ângulo cm radianos).**

(10-17)

Esta é a primeira de nossas relações entre grandezas lineares e angulares. *Atenção:*

o ângulo *J* deve ser medido em radianos, já que a Eq. 10-17 é usada precisamente

para definir o ângulo em radianos.

A Velocidade

Derivando a Equação 10-17 em relação ao tempo, com *r* constante, obtemos:

ds

de

- - ,

dt

***dt* .**

Acontece que *ds/dt* é a velocidade linear escalar (o módulo da velocidade linear) do

ponto considerado e *dJ/dt* é a velocidade angular w do corpo em rotação. Assim,

V =)/'

(ângulo em radianos).

(10-18)

***Atenção:* a velocidade angular *w* deve ser expressa em radianos por unidade de tempo.**

De acordo com a Eq. 10-18, como todos os pontos do corpo rígido têm a mesma

velocidade angular *w,* os pontos com valores maiores de *r* (ou seja, mais distantes do eixo de rotação) têm uma velocidade linear escalar v maior. A Fig. 10-9a serve

para nos lembrar que a velocidade linear é sempre tangente à trajetória circular do

ponto considerado.

Se a velocidade angular w do corpo ríido é constante, a Eq. 10-18 nos diz

que a velocidade linear v de qualquer ponto do corpo também é constante. Assim,

todos os pontos do corpo estão em movimento circular uniforme. O período de

revolução *T* do movimento de cada ponto e do corpo rígido como um todo é dado

pela Eq. 4-35:

2Tr

***T* = - -**

(10-19)

V

cujo centro é o eixo

***y* possuir uma componente**

da Fig. 10-2, visto de cima.

Circunferência

de rotação.

tangencial.

Cada ponto do corpo (como P)

descrita por *P*

descreve uma circunferência

em tomo do eixo de rotação.

p

p

(a) A velocidade linear i

r

***a*,**

de cada ponto é tangente à

circunferência na qual o ponto

Eixo de

Eixo de

se move. (b) A aceleração linear

rotação

rotação

ã **do ponto possui (em geral)**

duas componentes: a aceleração

tangencial *a,* e a aceleração

radial *a,*.

(a)

(b)

Esta equação nos diz que o tempo de uma revolução é igual à distância 27rr percorrida em uma revolução dividida pela velocidade escalar com a qual a distância é percorrida. Usando a Eq. 10-18 para *v* e cancelando *r,* obtemos relação

T **2**

= T

(ângulo em radianos}.

(10-20)

Esta equação equivalente nos diz que o tempo de uma revolução é igual ao ângulo

21r rad percorrido em uma revolução dividido pela velocidade angular escalar com

a qual o ângulo é percorrido.

A Aceleração

Derivando a Eq. 10-18 em relação ao tempo, novamente com *r* constante, obtemos: *dv*

dw

dt

dt r

(10-21)

.

Neste ponto, esbarramos em uma complicação. Na Eq. 10-21*, dv/dt* representa apenas a parte da aceleração linear responsável por variações do *módulo v* da velocidade linear *v.* Assim como *v,* essa parte da aceleração linear é tangente à trajetória do ponto considerado. Ela é chamada de *coponente tangencial a,* da aceleração linear

do ponto e é dada por

(ângulo em radinos),

(10-22)

onde *a = dw/dt. Atenção:* a acelração angular *a* da Eq. 10-22 deve ser expressa em radianos por unidade de tempo ao quadrado.

Além disso, de acordo com a Eq. 4-34, uma parícula (ou ponto) que se move

em uma rajetória circular tem uma *componente radial* da aceleração linear, *a,* =

v2/r* (dirigida radialmente para denro), que é responsável por variações da *direção* da velocidade linear i. Substituindo o valor de *v* dado pela Eq. 10-18, podemos escrever esta componente como *v2

a r* = - = *w2r

_r_

(ângulo en1 radianos).

(10-23)

Assim, como mostra a Fig. 10-9b, a aceleração linear de um ponto que pertence a

um corpo rígido em rotação possui, em geral, duas componentes. A componente

radial _ar_ (dada pela Eq. 10-23) está presente sempre que a velocidade angular do

corpo é diferente de zero (mesmo que não haja aceleração angular) e aponta para

$$a_r = 2a_t\theta.$$

o eixo de rotação. A componente tangencial *a,* (dada pela Eq. 10-22) está presente

apenas se a aceleração angular é diferente de zero e aponta na direção da angente

à trajetória do ponto.

"TESTE 3

Uma barata está na borda de um carrossel em movimento. Se a velocidade angular do

sistema *(carossel + barata)* é consante, a barata possui (a) aceleração radial e (b) aceleração tangencial? Se *w* está diminuindo, a barata possui (c) aceleração radial e (d) aceleração tangencial?

Exemplo

Variáveis lineares e angulares: movimento de uma montanha-russa

Apesar do extremo cuidado que os engenheiros tomam ao

Neste trecho, o

projetar uma montanha-russa, uns poucos infelizes entre

passageiro está

os milhões de pessoas que todo ano andam de montanhasubmetido a

russa são acometidos de um mal conhecido como *dor de*

uma aceleração

***cabeça de montanha-russa.* Enre os sintomas, que podem**

radial e a uma

levar vários dias para aparecer, estão verigens e dores de

aceleração

cabeça, ambas suficientemente graves para exigirem tra

p

tangencial.

tamento médico.

Vamos investigar a causa provável projetando uma

***monanha-russa de indução* (que pode ser acelerada por**

Neste trecho, o

forças magnéticas mesmo em um rilho horizontal). Para

passageiro está

embrque

provocar uma emoção inicial, queremos que os passageiros

sujeito apenas a

deixem o ponto de embarque com uma aceleração *g* ao lonuma aceleração

go da pisa horizontal. Para aumenar a emoção, queremos

tangencial.

também que a primeira parte dos trilhos forme um arco de Figura 10-1 O Vista superior de um recho horizontal da pista circunferência (Fig. 10-10), de modo que os passageiros de uma montanha-russa. A pista começa como um arco de também experimentem uma aceleração cenípeta. Quan circunferência no ponto de embarque e, a partir do ponto *P*,

do os passageiros aceleram ao longo do arco, o módulo continua ao longo de uma tangente ao arco.

da aceleração centrípeta aumenta de forma assustadora.

Quando o módulo *a* da aceleração resultante atinge 4g em

um ponto P de ângulo }, ao longo do arco, queremos que

o passageiro passe a se mover em linha rea, ao longo de *Cálculos* Como estamos tentando determinar um valor da uma tangente ao arco.

posição angular *8*, vamos escolher, entre as equações para

aceleração constante, a Eq. 10-14:

(a) Que ângulo 8, o arco deve subtender para que *a* seja

igual a 4g no ponto P?

w2 = õ + 2a(8 - 0).

(10-24)

IDEIA-CHAVE

Para obter a aceleração angular *a*, usamos a Eq. 10-22:

***a*,**

(1) Em qualquer instante, a aceleração resultante ã do

***a* = -.**

(10-25)

r

passageiro é a soma vetorial da aceleração tangencial ã,

ao longo dos ilhos com a aceleração radial ã, na direção Fazendo w

=

0* = O e 8 *0

O, obtemos:

do cenro de curvatura (como na Fig. *10-9b)*. (2) O valor

2

2a,8

de *a,* em qualquer instante depende da velocidade angular

=

.

(10-26)

r

instantânea *w,* de acordo com a Eq. 10-23 (a, = *w2r,* onde

***r é* o raio do arco de circunferência). (3) A aceleração Subsituindo este resultado na equação angular *a* ao longo do arco está relacionada à aceleração**

a *r* = *w2* r

(10-27)

tangencial *a,* ao longo dos trilhos através da Eq. 1 O-22

***(a, = ar)*. (4) Como *a,* e *r* são constantes, *a* também é obtemos uma relação entre a aceleração radial, a aceleraconstante e, portanto, podemos usar as equações para ace ção angencial e a posição angular 8: leração constante.**

(10-28)

$\theta = \frac{1}{2}$

$= \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2,$

$$K = \sum \frac{1}{2} m_i (\omega r_i)^2 = \frac{1}{2} \left(\sum m_i r_i^2 \right) \omega^2,$$

PARTE 1

ROTAÇÃO

261

Como ã *1* e ã, são vetores perpendiculares, o módulo da *Racioínio* No ponto *P, a* tem o valor planejado de *4g.*

soma dos dois vetores é dado por

Depois de passar por *P,* o passageiro se move em linha

reta e a aceleração centrípeta deixa de existir. Assim, o

***a = 'a; + [illegible]

(10-29) passageiro tem apenas a aceleração de módulo g ao longo

Subsituindo a, por seu valor, dado pela Eq. 10-28, e ex dos ilhos e, portanto,

plicitando 8, temos:

a = *4g* em *P* e a = *g* depois de *P.* (Resposta)

***ai* -**

A dor de cabeça de montanha-russa acontece quando

-

1.

a,

(10-30) a cabeça de um passageiro sore uma mudança brusca de

Quando *a* ainge o valor desejado, *4g,* o ângulo *J* é o ân aceleração, com altos valores de aceleração antes ou depois gulo 8

da mudança. A razão é que a mudança pode fazer com que

p cujo valor queremos calcular. Fazendo *a = 4g,*

***J* = 8**

o cérebro se mova em relação ao crânio, rompendo os vap e *a,* = g na Eq. 10-30, obtemos *º"*

sos que ligam o crânio ao cérebro. O aumento radual da

2

= [illegible] f [illegible] - l = I,94rad = 111º.

(Resposta) aceleração de g para 4g enre o ponto inicial e o ponto P

V gpode afetar alguns passageiros, mas é mais provável que

Cb) Qual é o módulo *a* da aceleração experimentada a variação abrupta da aceleração de 4g para g quando o pelo passageiro no ponto *P* e depois de passar pelo pon passageiro passa pelo ponto *P* provoque uma dor de cabeto *P?*

ça de montanha-russa.

1 0-6 Energia Cinética de Rotação

Quando está girando, o disco de uma serra elérica certamente possui uma energia

cinéica associada à rotação. Como expressar essa energia? Não podemos plicar a

fórmula convencional *K* = ,t *mv2* ao disco como um todo, pois isso nos daria apenas a energia cinéica do cenro de massa do disco, que é zero.

Em vez disso, vamos tratar o disco (e qualquer ouro corpo rígido em rotação)

como um conjunto de partículas com diferentes velocidades e somar a energia cinética dessas parículas para obter a energia cinéica do corpo como um todo. Segundo este raciocínio, a energia cinéica de um corpo em rotação é dada por

***K* = *}m* 1 *vy* -. [illegible] - , [illegible] +**

(10-31)

onde m; é a massa da parícula de ordem *i* e *V;* é a velocidade da parícula. A soma se estende a todas as parículas do corpo.

O problema da Eq. 10-31 é que *V;* não é igual para todas as paríELAS.

Resolvemos este problema substituindo *v* pelo seu valor, dado pela Eq. 10-18

(v = wr):

(10-32)

onde w é igual para todas as partículas.

A grandeza enre parênteses no lado direito da Eq. 10-32 depende da forma

como a massa do corpo está disribuída em relação ao eixo de rotação. Chamamos

essa grandeza de momento de inércia do corpo em relação ao eixo de roação. O

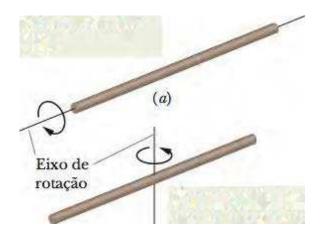
momento de inércia, representado pela letra /, depende do corpo e do eixo em tono

do qual está sendo executada a roação. (O valor de Item significado apenas quando

se sabe em relação a que eixo o valor foi medido.)

Podemos agora escrever

***I = L m;rr* (momento de incia)**

(10-33)

$$K = \frac{1}{2} I\omega^2$$

e subsituir naEq. 10-32, obtendo

(ângulo em radianos)

(10-34)

como a expressão que procuramos. Visto que usamos a relação *v* = *wr* na dedução da Eq. 10-34, w deve estar expressa em radianos por unidade de tempo. A unidade

de I no SI é o quilograma-mero quadrado (kg · m2).

'

E mais fácil fazer

A Eq. 10-34, que permite calcular a energia cinética de um corpo rígido em rogirar uma barra

tação pura, é a equivalente angular da expressão K = f Mvl

em torno deste

M, usada para calcular a

energia cinética de um corpo rígido em translação pura. As duas expressões envolvem

eixo.

um fator de i· Enquanto a massa M aparece em uma das equações, I (que evolve

tanto a massa quanto a disribuição de massa) aparece na oura. Finalmente, cada

equação contém como fator o quadrado de uma velocidade, de ranslação ou de rota

ção, conforme o caso. As enegias cinéicas de translação e de rotação não são tipos

diferentes de energia: ambas são energias cinéicas, expressas na forma apropriada

ao movimento em questão.

É mais difícil fazer

Observamos anteriormente que o momento de inércia de um corpo em rotação

girar uma barra

não envolve apenas a massa do corpo, mas também a forma como a massa está disem torno deste

ribuída. Aqui está um exemplo que você pode literalmente senir. Faça girar uma

(b)

eixo.

barra comprida e relaivamente pesada (um barra de fero, por exemplo), primeiro

'

Figua 10-11 E mais fácil fazer girar

em tomo do eixo cenral (longitudinal) (Fig. 10-1 *la)* e depois em tomo de um eixo

uma barra comprida em torno (a) do

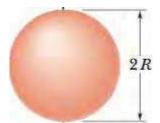
perpendicular à bara passando pelo cenro (Fig. 10-1 lb). As duas rotações envolvem

eixo cenral (longitudinal) do que (b)

a mesma massa, mas é muito mais fácil executar a primeira rotação que a segunda. A

de um eixo passando pelo cenro e

razão é que as partículas que formam a barra estão muito mais próximas do eixo na

perpendicular à maior dimensão da

primeira rotação. Em consequência, o momento de inrcia da barra é muito menor

barra. A razão para esta diferença é

na situação da Fig. 10-1 la do que na da Fig. 10-llb. Quanto menor o momento de

que a disribuição de massa está mais

inércia, mais fácil é executar uma rotação.

próxima do eixo de rotação em (a) do

que em (b).

-TESTE 4

A igura mosra rês pequenas esferas que giram em tono de um eixo vertical. A distância perpendicular entre o eixo e o centro de cada esfera é dada. Ordene as rês esferas de acordo com o momento de inércia em tono do eixo, começando pelo maior.

l m 36kg

Exo de

2 rn

roação-. -=.-Qg kg

3 m

4 kg

1 O-7 Cálculo do Momento de Inércia

Se um copo rígido contém um número pequeno de parículas, podemos calcular o momento de inércia em tomo de um eixo derotaçãousandoaEq. 10-33 (/ = ,m;t/),ou seja, podemos calcular o produto *m*- para cada parícula e somar os podutos. (Lembre-se de que r é a disância perpendicular de uma parícula ao eixo de roação.) Quando um corpo rígido contém um número muito grande de parículas muito

próximas umas das ouras (é *contínuo,* como um disco de plástico), usar a Eq. 10-33

toma-se impraticável. Em vez disso, substituímos o somatório da Eq. 10-33 por uma

interal e deinimos o momento de inércia do corpo como

J

I = r2 drn

(11101111:1110 de i n;rc ia • :orpo contínuo).

(10-35)

A Tabela 10-2 mosra o resultado dessa integração para nove formas geométricas

comuns e para os eixos de rotação indicados.

$I = \frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$

$I = \frac{2}{3}MR^2$

$I = \frac{1}{12}M(a^2 + b^2)$

6

(g)

$I = fMR^2$

(h)

(i)

Teorema dos Eixos Paalelos

Suponha que estamos interessados em determinar o momento de inércia *I de* um

corpo de massa *M* em relação a um eixo dado. Em princípio, podemos calcular o

valor de *I* usando a integral da Eq. 10-35. Contudo, o problema fica mais fácil se

conhecemos o momento de inércia IcM do corpo em relação a um eixo *paalelo*

ao eixo desejado, passando pelo cenro de massa. Seja *h* a distância perpendicular

enre o eixo dado e o eixo que passa pelo centro de massa (lembre-se de que os

dois eixos devem ser paralelos). Nesse caso, o momento de inércia *I* em relação

ao eixo dado é

$$1 = I_{cM} + Mh^2$$

(teorema dos eixos paralelos).

(10-36)

A Eq. 10-36, conhecida como teorema dos eixos paralelos, é demonstrada a se—

gu1r.

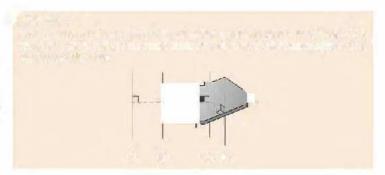
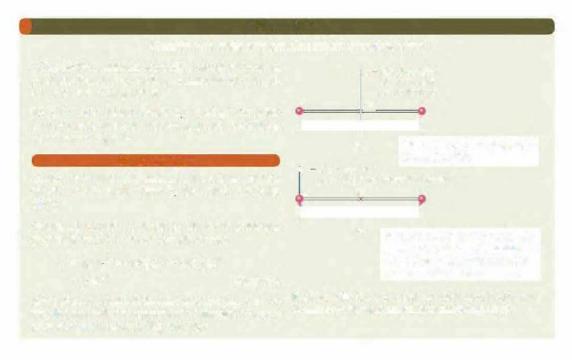
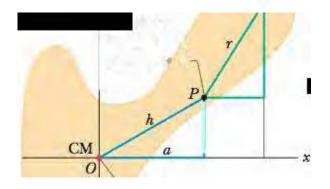
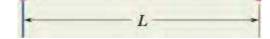
Demonstaão do Teorema dos ixos Paalelos

Seja *O* o cenro de massa de um corpo de forma arbirária cuja seção reta aparece na Fig. 10-12. Posicione em *O* a origem do sistema de coordenadas. Considere um eixo passando por *O* e perpendicular ao plano do papel e ouro eixo passando pelo

ponto *P* e paralelo ao primeiro eixo. Suponha que as coordenadas *x* e *y* do ponto *P*

sejam *a* e *b*, respecivamente.

Seja *dm* um elemento de massa de coordenadas genéricas *x* e *y*. De acordo com a Eq. 10-35, o momento de inércia do corpo em relação ao eixo que passa por *P é*

dado por

J

J J J

1 = (x2 *L y2) dm - 2a x dm* - 2b *y dm* + (a2 + *b1) dm.* (10-37)

dm

Eixo de

De acordo com a definição de centro de massa (Eq. 9-9), as duas integrais do meio

rotação que

passa por *P*

y -b

da Eq. 10-37 são as coordenadas do cenro de massa (muliplicadas por constantes)

e, portanto, devem ser nulas. Como 2 + *y2* = *R2,* onde *R* é a disância de *O* a *dm,* a *x-a*

primeira integral é simplesmente IcJ, o momento de inércia do corpo em relação a

b

um eixo passando pelo centro de massa. Observando a Fig. 10-12, vemos que o úlimo termo da Eq. 10-37 *éMh2,* onde *M* é a massa total do corpo. Assim, a Eq. 10-37

Eixo de rotação que

se reduz à Eq. 10-36, que é a relação que queríamos demonsrar.

passa pelo centro

de massa

ITESTE 5

A igura mostra um livro e quatro eixos de rotação, todos perpendiculares à capa do i

Figura 10-12 Seção ransversal de um

vro. Ordene os eixos de acordo com o momento de inércia do objeto em relação ao eixo,

corpo rígido, com o centro de massa em

começando pelo maior.

***O.* O teorema dos eixos paralelos (Eq.**

10-36) relaciona o momento de inércia

do corpo em relação a um eixo passando

por *O* ao momento de inércia em relação

' '

a um eixo paralelo ao primeiro passando

por um ponto *P* siuado a uma distância

***h* do centro de massa. Os dois eixos são**

perpendiculares ao plano da iura.

(1)

(2)

(3) (4)

Exemplo

Momento de inércia de um sistema de duas partículas

A Fig. *10-13a* mostra um corpo rígido composto por duas

-

**parí	culas de massa *m* ligadas por uma barra de compri**

- Eixo de rotação

passando pelo

mento *L* e massa desprezível.

centro de massa

m

(a) Qual é o momento de inércia /

CM

m

CJ em relação a um eixo

passando pelo cenro de massa e perpendicular à barra,

como mostra a igura?

(a)

Neste caso, o eixo de rotação

IDEIA-CHAVE

passa pelo CM.

Como temos apenas duas parículas com massa, podemos - -Eixo de rotação

passando pela extremidade da barra

calcular o momento de inércia /CM do corpo usando a Eq.

m

CM

m

10-33.

***Cálculos* Para as duas partículas, ambas a uma distância**

perpendicular *U2* do eixo de rotação, temos:

(b)

Neste caso, o eixo de rotação não

passa pelo CM, mas é paralelo ao

***Í = L ni;rr* = (m)(!L)2 + (,n)(!L)2**

anterior; por isso, podemos usar

o teorema dos eixos paralelos.

= ! rnL *2*•

(Resposta)

(b) Qual é o momento de inércia *I* do corpo em relação a Figura 10-13 Um corpo rígido composto por duas partículas um eixo passando pela exremidade esquerda da bara e de massa *m* unidas por uma barra de massa desprezível.

paralelo ao primeiro eixo (Fig. 10-13b)?

$$= \frac{M}{3L}\left[x^3\right]_{-L/2}^{+L/2}$$
$$= \frac{1}{12}ML^2.$$

$$\frac{M}{3L}\left[\left(\frac{L}{2}\right)^3 - \left(-\frac{L}{2}\right)^3\right]$$

PARTE 1

ROTAÇÃO

265

IDEIA-CHAVE

Sgunda técnica **Como já conhecemos /M, o momento**

Esta situação é tão simples que podemos determinar *I* de inércia em relação a um eixo que passa pelo cenro de usando duas técnicas. A primeira é semelhante à que foi massa, e como o eixo especiicado é paralelo a esse "eixo usada no item (a). A oura, mais geral, consiste em aplicar do CM", podemos usar o teorema dos eixos paralelos (Eq.

o teorema dos eixos paralelos.

10-36). Temos:

1 = f + Mh2

cM

= [illegible] + (2m)(!L) *2*

Primeira ténica **Calculamos *I* como no item (a), exceto**

pelo fato de que, agora, a distância perpendicular r; é zero

= mL2.

(Resposta)

para a parícula da esquerda e *L* para a parícula da direita.

De acordo com a Eq. 10-33,

***l* = m(0)2 + *mL!* = n1L2•**

(Resposta)

Exemplo

Momento de inércia de uma bara homogênea, calculado por integração

A Fig. 10-14 mosra uma bara ina, homogênea, de massa

***M* e comprimento *L*, e um eixo *x* ao longo da barra cuja**

I =

x2 - dx

Lx=+L2 (M)

origem coincide com o cenro da barra.

x=-1.12

L

(a) Qual é o momento de inércia da barra em relação a um

eixo perpendicular à barra passando pelo centro?

(Resposta)

I D EIAS-CHAVE

Este resultado está de acordo com o que aparece na Ta

(1) Como a barra é homogênea, o cenro de massa coincide bela 10-2e.

com o centro geomérico. Assim, o momento de inércia

pedido é l

(b) Qual é o momento de inércia *I* da barra em relação a

cM· (2) Como a barra é um objeto conínuo, precisamos usar a interal da Eq. 10-35,

J

um novo eixo perpendicular à bara passando pela exremidade esquerda?

***1* = r2 *dm*,**

(10-38)

IDEIAS-CHAVE

para calcular o momento de inércia.

Poderíamos calcular *I* mudando a origem do eixo *x* para

a exremidade esquerda da bara e integrando de *x* = O a

***Cálculos* Como queremos interar em relação à coorde *x* = *L*. Entretanto, vamos usar uma técnica mais geral (e nada *x* e não em relação à massa *m*, como na integral da mais simples), que envolve o uso do teorema dos eixos Eq. 10-38, devemos relacionar a massa *dm* de um elemento paralelos Eq. 10-36).**

da barra a um elemento de distância *x* ao longo da barra.

(Um desses elementos é mosrado na Fig. 10-14.) Como a *Cálculos* Colocando o eixo na extremidade esquerda da barra é homogênea, a razão entre massa e comprimento é barra e mantendo-o paralelo ao eixo

que passa pelo cenro a mesma para todos os elementos e para a bara como um de massa, podemos usar o teorema dos eixos paralelos (Eq.

todo, de modo que podemos escrever

10-36). De acordo com o item (a), lcM = *ML2/l2.* Como

clcrne11t1 de rr1assa d1n

n1assa da barra *M*

mosra a Fig. 10-14, a distância perpendicular *h* entre o

elemento de distância *x* comprin,ento da barra *L* novo eixo de rotação e o cenro de massa é *J2.* Substituindo esses valores na Eq. 10-36, temos: ou

l.

dm* = - *dx

L

1* = fcM + *Mh2* = / *ML2

2

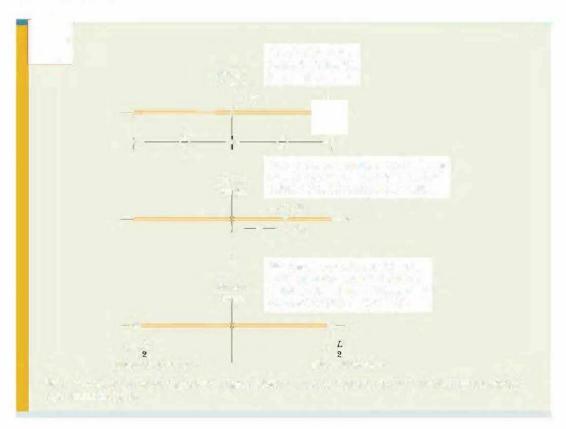
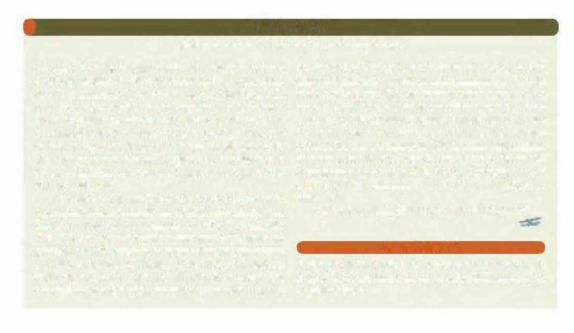
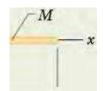
+ (M)(1L)2

Podemos agora subsituir *dm* por este valor e *r* por *x* na

= *iML2.*

(Resposta)

Eq. 10-38. Em seguida, integramos de uma exremidade Na verdade, o mesmo resultado é obido para qualquer eixo a oura da barra (de *x* = *-J2* a *x* = *U2)* para levar em perpendicular à barra passando pela extremidade esquerda conta todos os elementos. Temos:

ou direita, seja ou não paralelo ao eixo da Fig. 10-14.

Esta é a barra cujo

momento de inércia

Eixo de

queremos calcular.

–

rofcM

-

L

-

-

todos os elementos, da extremidade

rotação

esquerda à extremidade direita.

a

D

X

1

1

L

***x* = --**

***x* = -**

Extremidade esquerda

Extremidade direita

Figura 10-14 Uma barra homogênea de comprimento *L* e massa *M*. Um elemento de massa *dm* e comprimento *x* está representado na igura.

Exemplo

Enegia cinética de rotação: teste explosivo

As peças de máquinas que serão submeidas constante no coredor que levava à sala de testes, uma das poras da mente a rotações em alta velocidade costumam ser testa sala havia sido arremessada no estacionamento do lado de das em um *sistema de ensaio de rotação.* Nesse ipo de fora do prédio, um tijolo de chumbo havia aravessado a sistema, a peça é posta para girar rapidamente no interior parede e ivadido a cozinha de um vizinho, as vigas esrude uma montagem

cilíndrica de tijolos de chumbo com turais do edifício do teste inham sido daicadas, o chão um revestimento de contenção, tudo isso denro de uma de concreto abaixo da câmara de ensaios havia afundado câmara de aço fechada por uma tampa lacrada. Se a rota cerca de 0,5 cm e a tampa de 900 kg inha sido lançada ção faz a peça se esilhaçar, os ijolos de chumbo, sendo para cima, aravessara o teto e caíra de volta, desruindo macios, capturam os fragmentos para serem posterior o equipamento de ensaio (Fig. 10-15). Os ragmentos da mente analisados.

explosão só não penetraram na sala dos engenheiros por

Em 1985, a empresa Test Devices, Inc. (www.testde pura sorte.

vices.com) estava testando um rotor de aço maciço, em

Qual foi a energia liberada na explosão do rotor?

forma de disco, com uma massa M = 272 kg e um raio

R = 38,0 cm. Quando a peça atingiu uma velocidade angular w de 14.000 rv/min, os engenheiros que realizavam IDEIA-CHAVE

o ensaio ouviram um ruído seco na câmara, que ficava um A energia liberada foi igual à energia cinéica de rotação andar abaixo e a uma sala de distância. Na investigação, K do rotor no momento em que a velocidade angular era descobriram que ijolos de chumbo haviam sido lançados 14.000 rev/min.

mento de inércia/. Como o rotor era um disco que girava

como um carossel, *I* é dado pela expressão apropriada da

Tabela 10-2c *(I = i MR2).* Assim, temos:

J = [illegible] *2* = &(272 kg)(0,38 m)2 = 19,64 kg ·m2.

A velocidade angular do rotor era

***w* = (14 000 rev/mjn)(277 rad/rev)(1 [illegible]

6 sn)

= 1,466 x 103 rad/s.

Figua 10-15 Pate da desruição causada pela explosão de

Podemos usar a Eq. 10-34 para escrever

um disco de aço em ala rotação. *(Cortesia de Test Devices, Inc)*

***K* = *!I2* = !(19,64 kg·m2)(1,466 X 103 rad/s)2**

= 2,1 X 107 J.

***Cálculos* Podemos calcular *K* usando a Eq. 10-34**

(Resposta)

***(K* = i *I* w2), mas, para isso, precisamos conhecer o mo-Os engenheiros realmente iveram muita sorte.**

1 0-8 Toque

A maçaneta de uma pora fica o mais longe possível das dobradiças por uma boa razão. E claro que, para abrir uma porta pesada, é preciso fazer uma certa força, mas

isso não é tudo. O ponto de aplicação e a direção da força também são importantes. Se a força for aplicada mais perto das dobradiças que a maçaneta, ou com um ângulo diferente de 90º em relação ao plano da pora, será preciso usar uma força

maior para abrir a porta que se a força for aplicada à maçaneta, perpendicularmente

ao plano da porta.

A Fig. 10-16a mosra uma seção reta de um corpo que está livre para girar em

torno de um eixo passando por *O* e perpendicular à seção reta. Uma força F é aplicada no ponto *P*, cuja posição em relação a *O* é definida por um vetor posição *r*.

O ângulo entre os vetores *F* e r é J. (Para simpliicar, consideramos apenas forças

que não têm componentes paralelas ao eixo de rotação; isso significa que *F* está no

plano do papel.)

Para determinar o modo como *F* provoca uma rotação do corpo em torno do eixo

de rotação, podemos separar a força em duas componentes (Fig. 10-16b). Uma dessas componentes, a *componente radial F,*, tem a direção de *r.* Essa componente não provoca rotações, já que age ao longo de uma reta que passa por *O.* (Se você puxar

ou empurrar uma porta paralelamente ao plano da porta, a porta não vai girar.) A outra componente de *F,* a *componente tangencial F,,* é perpendicular a r e tem módulo *F,* = *F* sen J. Essa componente *provoca* rotações. (Se você puxar ou empurar uma porta perpendicularmente ao plano da porta, a porta vai girar.)

A capacidade de *F* fazer um corpo girar não depende apenas do módulo da componente tangencial *F,*, mas ambém da distância enre o ponto de aplicação de *F* e o ponto *O.* Para levar em cona os dois fatores, definimos uma grandeza chamada de

orque (T) como o produto de ambos:

T* = (r)(Fsen >*).

(10-39)

Duas formas equivalentes de calcular o torque são

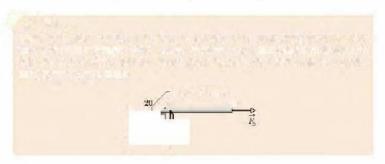
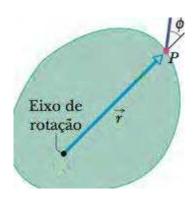
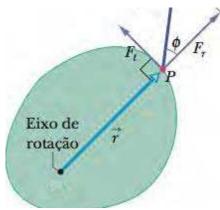
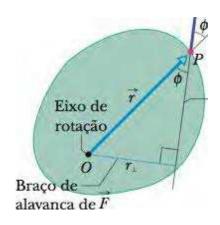
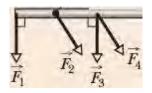
-r = (r)(Fsen >) = rF,

(10-40)

e

***T* = (r sen p)(F) = r.F,**

(10-41)

onde *r* . é a distância perpendicular enre o eixo de rotação que passa por *O* e uma reta que coincide com a direção do vetor *F* (Fig. 10-16c). Essa reta é chamada de

268

CAPÍTULO 1 O

-

linha de ação de *F* e *r* . é o braço de alavana de *F.* A Fig. 10-16b mosra que podemos descrever *r,* o módulo de ,, como o braço de alavanca de *F,,* a componente

F

tangencial de *F,*.

O torque, cujo nome vem de uma palavra em latim que signiica "torcer", pode

ser descrito coloquialmente como a ação de girar ou torcer de uma força *F.* Quando

aplicamos uma força a um objeto com uma chave de fenda ou uma chave de grifa com

o objetivo de fazer o objeto girar, esamos aplicando um torque. A unidade de torque

do SI é o nwton-metro (N · m). *Atenção:* no SI, o rabalho também tem dimensões

o

de newton-metro. Torque e rabalho, contudo, são grandezas muito diferentes, que

não devem ser confundidas. O trabalho é normalmente expresso em joules (1 J = 1

O torque produzido por esta

N · m), mas isso nunca acontece com o torque.

força faz o corpo girar em torno

No próximo capítulo discutiremos o torque em geral como uma grandeza vedeste eixo, que é perpendicular torial. No momento, porém,

como vamos considerar apenas rotações em tomo de

ao plano do papel.

um único eixo, não precisamos usar a notação vetorial. Em vez disso, aribuímos

ao torque ou um valor positivo ou negativo, dependendo do sentido da rotação que

(a)

imprimiria a um corpo a parir do repouso. Se o corpo gira no senido ani-horário,

'

o torque é posiivo. Se o corpo gira no senido horário, o torque é negaivo. (A frase

/

'

/

'

/

"os relógios são negaivos" da Seção 10-2 continua válida.)

***/* -**

'

/

/

F

O torque obedece ao princípio de superposição que discutimos no Capítulo 5

para o caso das forças: quando vários torques atuam sobre um corpo, o torque otal

(ou orque rsultante) é a soma dos torques. O símbolo de torque resultante é *T,s*·

ITESTE 6

o

A iura mosra uma vista superior de uma régua de um metro que pode girar em tomo de

um eixo situado na posição 20 (20 cm). As cinco forças aplicadas à régua são horizontais

e têm o mesmo módulo. Ordene as forças de acordo com o módulo do torque que produ

Na verdade, apenas a

zem, do maior para o menor.

componente *tangencial* da força

produz a rotação.

Eixo de rotação

O

40

100

(b)

- *F*

1 0-9 A Segunda Lei de Newton para Rotações

**Linha [illegible]

Um torque pode fazer um corpo rígido girar, como acontece, por exemplo, quando

acão *deF*

abrimos ou fechamos uma porta. No momento, estamos interessados em relacionar

o torque resultante T,s aplicado a um corpo rígido à aceleração angular *a* produzida pelo torque. Fazemos isso por analogia com a segunda lei de Newton (F, •• = *ma)*

para a aceleração *a* de um corpo de massa *m* produzida por uma força resultante *F* s ao longo de um eixo. Substituímos *F* -' por *T* es, *m* por *I* e *a* por *a,* o que nos dá Também podemos calcular o

torque usando o módulo da força

T; =]a

(egunda lei de Newton para rotações).

(10-42)

total e o comprimento do braço

de alavanca.

Demonstração da quação 10-42

(e)

Vamos demonsrar a Eq. 10-42 considerando a situação simples da Fig. 10-17, na

qual o corpo rígido é consituído por uma partícula de massa *m* na exremidade de

Figua 10-16 (a) Uma força *F* age

uma barra de massa despreível de comprimento

sobre um corpo rígido com um eixo de

***r.* A barra pode se mover apenas**

rotação perpendicular ao plano do papel. girando em tomo de um eixo, perpendicular ao plano do papel, que passa pela oura O torque pode ser calculado a partir

exremidade da barra. Assim, a parícula pode se mover apenas em uma rajetória

(a) do ângulo *p*, (b) da componente

circular com o cenro no eixo de rotação.

tangencial da força, *F*,, ou (e) do braço

Uma força *F* age sobre a partícula. Como, porém, a parícula só pode se mover

de alavanca, *r*..

ao longo de uma trajetória circular, apenas a componente tangencial *F*, da força (a

componente que é tangente à rajetória circular) pode acelerar a partícula ao longo O torque associado à componente da trajetória. Podemos relacionar *F,* à aceleração tangencial *a,* da partícula ao longo tangencial da força produz uma da rajetória aravés da segunda lei de Newton, escrevendo

aceleração angular em tomo do

F,

eixo de rotação.

= *ma,*.

De acordo com a Eq. 10-40, o torque que age sobre a partícula é dado por

y

r = F,r = m.a,r.

De acordo com a Eq. 10-22 *(a, = ar),* temos:

r = ni(ar)r = (,nr2)a.

(10-43)

A grandeza enre parênteses do lado direito é o momento de inrcia da partícula em

relação ao eixo de rotação, (veja a Eq. 10-33, aplicada a uma única partícula). Assim, a Eq. 10-43 se reduz a *r = Ta*

(ângulo em radianos).

(10-44)

Eixo de rotação

onde *I* é o momento de inércia.

Se a partícula estiver submetida a várias forças, podemos generalizar a Eq. Figura 10-17 Um corpo rígido 10-44 escrvendo

simples, livre para girar em tono de

um eixo que passa por *O*, é formado

. =

por uma partícula de massa *m* presa

S *Ta*

(ângulo em radianos).

(10-45) na exremidade de uma barra de

que é a equação que queríamos demonsrar. Podemos estender esta equação a qual comprimento *r* e massa desprezível. A quer corpo rígido girando em tono de um eixo ixo, uma vez que qualquer corpo aplicação

de uma força *F* faz o corpo pode ser considerado um conjunto de partículas.

girar.

TESTE 7

1

um metro que pode girar em tono do ponto indicado, f

A figura mostra uma vista superior de uma réua de

[illegible] de rotação**

que está à esquerda do ponto médio da régua. Duas _

forças horizontais, ; e [illegible] são aplicadas à réua. Ape- F1

nas ; é mosrada na igura. A força F *2* é perpendicular

à régua e é aplicada à extremidade direita. Para que a réua não se mova, (a) qual deve ser

o sentido de F *2* e (b) *F2* deve ser maior, menor ou igual a *F1?*

Exemplo

Segunda lei de Newton, rotação, torque, disco

A Fig. 10-18a mostra um disco homogêneo, de massa (r,., = *Ia)*. (3) Para combinar os movimentos do bloco e *M* = 2,5 kg e raio *R* = 20 cm, montado em um eixo hori do disco, usamos o fato de que a aceleração linear *a* do zontal fixo. Um bloco de massa *m* = 1,2 kg esá pendurado bloco e a aceleração linear (tangencial) *a,* da borda do por uma corda de massa desprezível enrolada na borda do disco são iguais.

disco. Determine a aceleração do bloco em queda, a aceleração angular do disco e a tensão da corda. A corda não *oas que gem sobe* o *bloco* Estas

forças estão reescorrega e não existe arito no eixo.

presentadas no diagrama de corpo livre do bloco (Fig.

10-18b): a força da corda é f e a força raviacional é *g*,

I D EIAS-CHAVE

de módulo *mg*. Podemos escrever a segunda lei de Newton

(1) Considerando o bloco como um sistema, podemos para as componentes ao longo de um eixo vertical *y* (F,e,,y =

relacionar a aceleração *a* às forças que _gem sobre o may) como

bloco através da segunda lei de Newton (Fs = *ã)*. (2)

Considerando o disco como um sistema, podemos rela

T - mg = nia.

(10-46)

cionar a aceleração angular *a* ao torque que age sobre Entretanto, não podemos obter o valor de *a* usando apenas o disco aravés da segunda lei de Newton para rotações esa equação porque ela também contém a incógnita *T.*

$$-RT = \frac{1}{2}MR^2\alpha.$$

***Torque exerido sobre* o *sco* Anteriormente, quando**

O torque associado à

esgotávamos as possibilidades com o eixo *y*, passávamos

tensão da corda produz

para o eixo *x.* Aqui, passamos para a rotação do disco. Para

- uma aceleração

calcular os torques e o momento de inércia/, usamos o fato

***T* angular do disco.**

de que o eixo de rotação é perpendicular ao disco e passa

pelo cenro do disco, o ponto *O* da Fig. 10-18c.

(e)

Essa duas forças

Nesse caso, os torques são dados pela Eq. 10-40 *(r*

(b)

o disco girar no senido horário. De acordo com a Tabela

10-2c, o momento de inércia I do disco é *R*

Figura 10-18 (a) O corpo em queda faz o disco girar. (b)

***2/2.* Assim, Diagrama de corpo livre do bloco. (e) Diarama de corpo livre**

podemos escrver a equação *T,es = la* na forma

incompleto do disco.

(10-47) Podemos usar a Eq. 10-48 para calcular T:

Esta equação pode paecer inúil porque tem duas incógnitas, *a* e T, nenhuma das quais é a incónita *a* cujo valor T = -! Ma = -!(2,5 kg)(-4,8 n1/s2)

queremos determinar. Enetanto, com a persistência que é a

= 6,0 N.

(Resposta)

marca regisrada dos ísicos, conseguimos tomá-la úil quando nos lembramos de um fato: como a corda não escorrega, Como era de se esperar, a aceleração *a* do bloco que cai a aceleração linear *a* do bloco e a aeleração linear (tangen é menor que *g* e a tensão T da corda (= 6,0 N) é menor cial) *a,* de um ponto na borda do disco são iguais. Nesse caso, que a força gravitacional que age sobre o bloco (= *mg* =

de acordo com a Eq. 10-22 (a, = *ar),* vemos que *a* = *a/R.* 11,8 N). Vemos também que *a* e T dependem da massa Subsituindo este valor na Eq. 10-47, obtemos:

do disco, mas não do raio. A título de veriicação, notamos que as expressões obtidas se reduzem *a* = *-g* e T = -t Ma.

Como foi visto no Capítulo 7, quando uma força F acelera um corpo rígido de massa

***m* ao longo de um eixo de coordenadas, a força realiza um rabalho *W* sobre o corpo.**

Isso significa que a energia cinéica do corpo *(K* = f *mv2)* varia Suponha que esta seja a única energia do corpo que muda. Nesse caso, podemos relacionar a variação

K da energia cinéica ao trabalho *W* aravés do teorema do rabalho e energia cinéica (Eq. 7-10), escrevendo

.*K = Kr - K; = !n1v} - !1nvf = W* [illegible] (10-49) Para um movimento resrito a um eixo *x*, podemos calcular o trabalho usando a Eq.

7-32,

***W = L x, Fdx* (trabalho, movi111enlo unidimensional).**

(10-50)

X,

A Eq. 10-50 se reduz a *W = Fd* quando *Fé* consante e o deslocamento do corpo

$$W = \tau(\theta_f - \theta_i)$$

$$\Delta K = K_f - K_i = W.$$

$$\Delta K = \tfrac{1}{2}mr^2\omega_f^2 - \tfrac{1}{2}mr^2\omega_i^2 = W.$$

PARTE 1

ROTAÇÃO

271

é *d.* A taxa com a qual o trabalho é realizado é a potência, que pode ser calculada usando com as Eqs. 7-43 e 7-48,

dW

***P* =**

= *Fv*

(otência, n1ovimento unidimensional).

(10-51)

dt

Vamos considerar uma situação análoga para rotações. Quando um torque acelera um corpo rígido que ira em tomo de um eixo ixo, o torque realiza um trabalho *W* sobre o corpo. Isso signiica que a energia cinética rotacional do corpo *(K* = t *I* w2) varia. Suponha que esta seja a única energia do corpo que muda Nesse caso, podemos relacionar a variação *lK* da energia cinéica ao rabalho *W* aravés do teorema do trabalho e energia cinéica, mas agora a enegia cinéica é uma energia cinéica rotacional:

.K = 1 - 1(*1* = !Iw} - !Jwr = W (teoremado trabalhoe eneríacinélica). (10-52)

onde *I* é o momento de inércia do corpo em relação ao eixo fixo e *W;* e *w1* são, respectivamente, a velocidade angular do corpo antes e depois que o trabalho é

realizado.

Podemos calcular o trabalho executado em uma rotação usando uma equação

análoga à Eq. 10-50,

***W* = 1 Td8 (trabalho. rotação em tomo de um eico fixo). (10-53)**

1,

i,

onde *T* é o torque responsável pelo rabalho W e }; e 8 *1* são, respecivamente, a posi

ção angular do corpo antes e depois da rotação. Quando *T* é constante, a Eq. 10-53

se reduz a

(trabalho. torque consllnte).

(10-54)

A taxa com a qual o rabalho é realizado é a potência, que pode ser calculada usando

uma equação equivalente à Equação 10-51,

dW

***P* =**

= *TW*

dt

(potência. rotação em tomo de um ei\O).

(10-55)

A Tabela 10-3 mosra as equações que descrevem a rotação de um corpo rígido em

translação e as equações correspondentes para movimentos de rotação.

Demonstaão das Equaões 10-52 a 10-55

Vamos considerar novamente a situação da Fig. 10-17, na qual uma força *F* faz

girar um corpo rígido composto por uma partícula de massa *m* presa à extremidade

de uma bara de massa desprezível. Durante a rotação, a força *F* realiza rabalho

sobre o corpo. V amos supor que a única energia do corpo que varia é a energia

cinética. Nesse caso, podemos aplicar o teorema do trabalho e energia cinética da

Eq. 10-49:

(10-56)

Usando a relação *K* = *tmv2* e a Eq. 10-18 *(v* = *wr),* podemos escrever a Eq. 10-56

na forma

(10-57)

De acordo com a Eq. 10-33, o momento de inércia do corpo é *I* = *m2*• Subsituindo este valor na Eq. 10-57, obtemos

.K = !lw} - [illegible] = W,

$\tau_{res} = I\alpha$

Tabela 10-3

Algumas Correspondências entre os Movimentos de Translação e Rotação

Translação Pura (Direção Fixa)

Rotação Pura (Eixo Fixo)

Posição

x

Posição angular

o

Velocidade

v = dxld1

Velocidade angular

JJ = d(/dt

Aceleração

a = dv/dt

Aceleração angular

a = d,idt

Massa

m

Momento de inércia

I

Segunda lei de Newton

F

. = ***n1a***

Segunda lei de Newton

Trabalho

W **= J** ***F*** **dx Trabalho**

*******V*****= J** ***Td8***

Energia cinética

K **= {111v2**

Energia cinética

K = !Jw2

Potência (força constante)

I' **- F11**

Potência (toque consante)

p **=** ***T)***

Teorema do trabalho e energia cinética ***W*** **= .*****K***

Teorema do rabalho e energia cinéica W = ó.K

que é a Eq. 10-52. Demonstramos esta equação para um corpo rígido paricular,

mas a mesma equação é válida para qualquer corpo rígido em rotação em torno de

um eixo fixo.

Vamos agora relacionar o trabalho *W* realizado sobre o corpo da Fig. 10-17 ao

torque *T* exercido sobre o corpo pela força *F.* Quando a parícula se desloca de uma distância *ds* ao longo da rajetória circular, apenas a componente angencial *F,* da força acelera a parícula ao longo da rajetória. Assim, apenas *F,* realiza trabalho sobre a parícula. Esse rabalho *dW* pode ser escrito como *F, ds.* Enretanto, podemos substiuir ds por *r* de, onde de é o ângulo descrito pela parícula. Temos, portanto,

dW = [illegible]

(L0-58)

De acordo com a Eq. 10-40, o produto *F,r* é igual ao torque *T,* de modo que podemos escrever a Eq. 10-58 na forma

dW = *rd1.*

(L0-59)

O trabalho realizado em um deslocamento angular fmito de *e;* para *e1*é, portanto, *W* = *re,*

J T d},

.

que é a Eq. 10-53, válida para qualquer corpo rígido em rotação em tomo de um eixo

ixo. A Eq. 10-54 é uma consequência direta da Eq. 10-53.

Podemos calcular a potência *P* desenvolvida por um corpo em um movimento

de roação a partir da Eq. 10-59:

***p* = dW = d}**

T

= *j)*

dt

dt

,

que é a Eq. 10-55.

Exemplo

Trabalho, energia cinética de rotação, torque, disco

Suponha que o disco da Fig. 10-18 parte do repouso no

IDEIA-CHAVE

instante *t* = O, que a tensão da corda de massa desprezível é 6,0 N e que a aceleração angular do disco é -24 Podemos calcular Kusando a Eq. 10-34 *(K* = t Jw). Já sarad/s2• Qual é a energia cinética de rotação *K* no insante bemos que *I* = t *R2*, mas ainda não conhecemos o valor t = 2,5 s?

de w no instante *t* = 2,5 s. Entreanto, como a aceleração

$$\alpha_{méd} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1,$$

angular a tem o valor constante de -24 rad/s2, podemos (K *1* - K; = *W)*. Subsituindo 0 por K e Ki por O, obtemos aplicar as equações para aceleração angular constante na

Tabela 10-1.

K = *K;* + *W* = O + *W* = *W.*

(10-60)

Em seguida, precisamos calcular o rabalho *W.* Po

Cálculos Como estamos interessados em determinar *v* e demos relacionar W aos torques que atuam sobre o disco conhecemos a e *v0* (= O), usamos a Eq. 10-12:

usando a Eq. 10-53 ou a 10-54. O único torque que produz

aceleração angular e realiza trabalho é o torque f que a

w = *o* + *al* = *O* + *ai* = *al.*

corda exerce sobre o disco, que é igual a - *TR.* Como a é

temos:

K = W = -7-R(&r - 9;) = -TR(}at *2)* = -!7ªRat *2*

***Cálculos* Primeiro, relacionamos a *variação* da energia**

cinética do disco ao rabalho total

= -!(6,0 N)(0,20 m)(-24 rad/s2)(2,5 s)2

***W* realizado sobre o**

disco, usando o teorema do trabalho e energia cinética

= 90 I.

(Resposta)

1

REVISÃO E RESUMO

1

Posição Angular Para descever a rotação de um corpo ígido em

d8

torno de um eixo fixo, chamado de eixo de rotação, supomos que

=

w t.

(10-6)

uma reta de referência está fixa no corpo, perpendicular ao eixo e

girando com o corpo. Medimos a posição angular *8* desta reta em Tanto wméd como *w* são vetores, cuja orientação é dada pela regra relação a

uma direção ixa. Quando 8 é medido em radianos,

da mão direita da Fig. 10-6. O módulo da velocidade angular do

corpo é a velocidade angular escalar.

s

8 = r

(ngulo em adinos),

(10.1) Aceleração Angular Se a velocidade angular de um corpo varia

onde s

de w

é o comprimento de um arco de circunferência de raio r e

1 para *w2* em um intervalo de tempo *.t* = *t2* - t1, a aceleração ângulo *8.* A elação enre um ângulo em revoluções, um ângulo em angular média a111d do corpo é graus e um ângulo em radianos é a seguinte:

Aw

(1 O-7)

1 rev - 360° - 2r rad.

(10-2)

At

Deslocamento Angular Um corpo que gira em tono de um A aceleração angular (instantânea) *a* do corpo é eixo de rotação, mudando de posição angular de 81 para 8 *2,* sore

dw

A velocidade angular (instantânea) *w* do corpo é

w *2* - Wi1 + *2a(O* - Ou),

(10-14)

(10-17) Toque *Torque* é uma ação de girar ou de torcer um corpo em

onde 8 está em radianos.

tono de um eixo de rotação, produzida por uma força F. Se F é

A velocidade linear *v* do ponto é angente à circunferência; a exercida em um ponto dado pelo vetor posição *r* em relação ao eixo, velocidade escalar linear *v* do ponto é dada por

o módulo do torque é

v = wr

(ângulo em r.1dianos),

(10.18)

-r = rF, = r. F = rF sen >,

(10-40, 10-41, 10-39)

onde w é a velocidade angular escalar do corpo em radianos por

segundo.

onde *F,* é a componente de F perpendicular a *r* e > é o ângulo en

A aceleração linear ã do ponto tem uma componente *tangencial* tre r e *F.* A grandeza *r.* é a disância perpendicular enre o eixo de e uma componene *rdial.* A componente tangencial é

rotação e a reta que coincide com o vetor F. Essa reta é chamada

de linha de ação de F e *r.* é chamada de braço de alavanca de F.

a

(ângulo em radianos).

(10-22) Da mesma forma, r é o braço de alavanca de F,.

1 = *ar*

onde

A unidade de torque do SI é o newton-metro (N · m). O torque

***a* é o módulo da aceleração angular do corpo em radianos por**

segundo ao quadrado. A componente radial de a é

***T* é positivo se tende a girar um corpo inicialmente em repouso no**

sentido antihorário e negativo se tende a girar o corpo no senido

v2

a

horário.

r* = - = *dr

(ângulo cin radianos),

(10-23)

r

No caso do movimento circular uniforme, o período *T* do mo Segunda Lei de Newton para Rotações A segunda lei de vimento do ponto e do corpo é

Newton para roações é

T

T'" = 1 a,

(10-45)

= 2Tr = 2T

(ângulo em [illegible] (10-19, l 0-20)

V

W

onde *T* é o torque resultante que age sobre a partícula ou corpo

.

rígido, *I* é o momento de inércia da partícula ou do corpo em rela

Energia Cinética de Rotação e Momento de Inércia A ção ao eixo de rotação e a é a aceleração angular do movimento de energia cinética *K* de um corpo rígido em rotação em torno de um rotação em tomo do eixo.

eixo fixo é dada por

K* = *!I* w *2

[illegible] en1 radianos).**

(10-34) Trabalho e Energia Cinética de Rotaão As equções usadas

para calcular rabalho e poência para movimentos de rotação são

onde *I* é o momento de inércia do corpo, definido por

análogas às usadas para movimentos de ranslação:

I - *L* n1;1·1

(10-33)

/,

t
1
3
t
0
2
$\vec{F}_2$

1

P E R G U N T A S

1

1 A Fig. 10-19 é um gráfico da velocidade angular em função do rário e com velocidade angular constante. Precisamos diminuir o tempo para um disco que gira como um carossel. Ordene os insan ângulo *)* de *i* sem mudar o módulo de i. (a) Para manter a velotes *a, b,* c e *d* de acordo com o módulo (a) da aceleração tangencial e cidade angular constante, devemos aumentar, diminuir ou manter (b) da aceleração radial de um ponto na borda do disco, começando consante o módulo de *i?* (b) A força *i* tende a girar o disco no pelo maior.

sentido horário ou ani-horário? (c) E a força *i?*

1

----r--

}

1

-t

Figura 10-19 Pergunta 1.

a

b

e

d

\ \ \

2 A Fig. 1 O-20 mostra gráicos da posição angular *e* em função do Figura 10-22 Pergunta 5.

tempo *t* para rês casos nos quais um disco gira como um carrossel.

Em cada caso, o sentido de rotação muda em uma certa posição 6 Na vista superior da Fig. 10-23, cinco forças de mesmo módulo angular 8

agem sobre um estranho carrossel: um quadrado que pode girar em

111• (a) Para cada caso, determine se 81 corresponde a uma

rotação no senido horário ou ani-horário em relação à posição *e* = tono do ponto *P,* o ponto médio de um dos lados . Ordene as for

O ou se *e* = O. Para cada caso, determine (b) se w é zero antes, depois ças de acordo com o torque que produzem em relação ao ponto *P,*

ou no instante

começando pelo maior.

t = O e (c) se a é positiva, negaiva ou nula.

-

}

90°

:

,•,,

- 90°

Figura 10-23 Pergunta 6.

Figura 10-20 Pergunta 2.

7 A Fig. 10-24a é uma vista superior de uma barra horizontal que

3 Uma força é aplicada à borda de um disco que pode girar como pode girar em tomo de um eixo; duas forças horizontais atuam sobe um carrossel, fazendo mudar a velocidade angular do disco. As a barra, que esá parada. Se o ângulo enre a *i* e a barra é reduzido velocidades angulares inicial e fmal, respecivamente, para quaro a partir de 90", F

situações, são as seguintes: (a) -2 rad/s, *5* rad/s; b) 2 rad/s, 5 rad/s;

***2* deve aumentar, diminuir ou permanecer a mesma**

para que a barra continue parada?

(c) -2 rad/s, -5 rad/s; e (d) 2 rad/s, -5 rad/s. Ordene as situações

-

-

de acordo com o rabalho realizado pelo torque aplicado pela força,

começando pelo maior.

j

F2

Eixo de roação

Eixo de roação

4 A Fig. 10-2lb é um gráfico da posição angular do disco da Fig.

.

-

10-21a. A velocidade angular do disco é posiiva, negaiva ou nula

em (a) *t* = 1 s, b) *t* = 2 s, e (c) *t* = 3 s? (d) A aceleração angular é positiva ou negativa?

(a)

(b)

Figua 10-24 Pergunas 7 e 8.

9 (rad)

! Eixo de roação

8 A Fig. 10-24b mostra uma vista superior de uma barra horizontal

1

que gira em torno de um eixo sob a ação de duas forças horizonais,

i e *F2*, com *F2* fazendo um ângulo , com a bara. Ordene os seguintes valores de p de acordo com o módulo da aceleração angular da

-

--<--

-

1

3- -

t (s)

barra, começando pelo maior: 90", 70" e 110°.

9 A Fig. 10-25 mosra uma placa metálica homogênea que era

quadrada antes que 25% de sua área

fossem cortados . Três pontos estão

(a)

(b)

***a*-- -**

[illegible]

indicados por leras. Ordene-os de

Figura 10-21 Pergunta 4.

acordo com o valor do momento de

b--!

inércia da placa em relação a um

5 N a Fig. 10-22, duas forças, *i* e *F2,* agem sobre um disco que eixo perpendicular à placa passando _

gira em torno do cenro como um carrossel. As forças mantêm os por esses pontos, começando pelo

.

_ - - e *e*

ângulos indicados durante a roação, que ocorre no sentido ani-ho- maior.

Figura 10-25 Pergunta 9.

-

-

-

10 A Fig. 10-26 mostra três discos planos (de raios iguais) que

F

F

F

podem girar em torno do centro como carrosséis. Cada disco é composto dos mesmos dois materiais, um mais denso que o outro (ou seja, com uma massa maior por unidade de volume). Nos discos 1

e 3, o material mais denso forma a metade externa da área do disco.

No disco 2, ele forma a metade intena da área do disco. Forças de

mesmo módulo são aplicadas tangencialmente aos discos, na borda

Mais denso

Menos denso

Mais denso

ou na interface dos dois materiais, como na iura. Ordene os dis

Disco l

Disco 2

Disco 3

cos de acordo (a) com o torque em relação ao centro do disco, (b) o Figura 10-26 Pergunta 10.

momento de inércia em relação ao cenro e (c) a aceleração anular

do disco, em ordem decrescente.

P R O B L E M A S

·--

1

O número de pontos indica o grau de diiculdade do probl ema

- Informaões adicionais disponíveis em O *Circo Voador da sica* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 10-2 As Variáveis da Roação

***t* = O, a roda tem uma velocidade angular de +2,0 rad/s e uma pos i**

• 1 Um bom lançador de beisebol pode arremessar uma bola a 85 ção anular de + 1,0 rad. Escreva expressões (a) para a velocidade mi/h com uma rotação de 1800 rev/min. Quantas revoluções a bola angular (em rad/s) e (b) para a posição angular (em rad) em função realiza até chegar à base principal? Para simpliicar, suponha que a do tempo (em s).

rajetória de 60 pés é percorrida em linha reta.

•2 Qual é a velocidade angular (a) do ponteiro dos segundos, (b) Seção 10-4 Rotaão com Aceleração Angular do ponteiro dos minutos e (c) do ponteiro das horas de um relógio Constante

analógico? Dê as respostas em radianos por se

•9 Um tambor gira em tono do eixo cenral com uma velocidade

undo.

• •3

Quando uma torrada com manteiga é deixada cair de angular de 12,60 rad/s. Se o tambor é freado a uma taxa consante uma mesa, adquire um movimento de rotação. Supondo que a dis de 4,20 rad/s2, (a) quanto tempo leva para parar? b) Qual é o ânulo tância da mesa ao chão é 76 cm e que a torrada não descreve uma total descrito pelo tambor até parar?

revolução complea, determine (a) a menor e (b) a maior velocidade • 1 O Partindo do repouso, um disco ira em tono do eixo cenral com an

uma aceleração an

ular para a qual a torrada cai com a manteiga para baixo.

ular onstante. O disco gira 25 rad em 5,0 s. Du

• •4 A posição an

rante esse tempo, qual é o módulo (a) da aceleração angular e b) da

ular de um ponto de uma roda é dada por e = 2,0 +

***4,0t2* + 2,0t3, onde *8* está em radianos e *t* em segundos. Em velcidade angular média? (c) Qual é a velocidade an**

***t* = O,**

ular insanânea

qual é (a) a posição e b) a velcidade angular do ponto? (c) Qual é do disco ao final dos 5,0 s? (d) Com a aceleração angular mantida, que a velocidade angular em *t* = 4,0 s? (d) Calcule a aceleração an

ângulo adicional o disco irá descrever nos 5,0 s seguintes?

ular

em *t* = 2,0 s. (e) A acelração an

• 1 1 Um disco, inicialmente girando a 120 rad/s, é freado com uma

ular da roda é constante?

••5 Um mergulhador realiza 2,5 giros ao saltar de uma plaaforma aceleração angular constante de módulo 4,0 rad/s2• (a) Quanto temde 10 meros. Supondo que a velocidade vertical inicial seja nula, po o disco leva para parar? (b) Qual é o ângulo toal descrito pelo determine a velocidade angular média do mergulhador.

disco durante esse tempo?

• •6 A posição an

• 12 A velocidade angular do motor de um automóvel é aumentada

ular de um ponto da borda de uma roda é dada

por *8 = 4,0t*-3,0t2 + t3, onde *8* está em radianos e tem segundos. a uma axa constante de 1200 revlmin para 3000 revlmin em 12 s. (a) Qual éa velocidade angular em (a) *t* = 2,0 s e b) *t* = 4,0 s? (c) Qual Qual é a aceleração anular em revoluções por minuto ao quadrado?

é a aceleração angular média no intervalo de tempo que começa em (b) Quantas revoluções o motor execua nesse intervalo de 12 s?

***t* = 2,0 s e ermina em *t* = 4,0 s? Qual é a aceleração angular ins**

••13 Uma roda executa 40 revoluções quando desacelera a parir

tantânea (d) no início e (e) no im deste intervalo?

de uma velcidade anular de 1,5 rad/s até parar. (a) Supondo que a

•••7 A roda da Fig. 10-27 tem oito

aceleração anular é constane, determine o empo em que a roda leva

raios de 30 cm igualmente espaça-

para parar. b) Qual é a aceleração anular da roda? (c) Quanto tempo

dos, está montada em um eixo ixo

é necessário para que a roda complete as 20 primeiras revoluções?

e gira a 2,5 revis. Você deseja airar

••14 Um disco gira em tono do eixo cenral parindo do repouso

uma lecha de 20 cm de comprimen-

com aceleração angular constante. Em um certo insante, está girando

to paralelamente ao eixo da roda

/

a 10 revis; após 60 revoluções, a velocidade angular é 15 revis. Calsem atingir um dos raios. Suponha cule (a) a aceleração anular, (b) o tempo necessário para completar

que a lecha e os raios são muito i -

60 revoluções, (c) o tempo necessário para atinir a velocidade annos. (a) Qual é a menor velocidade Figura 10-27 Problema 7. gular de 10 revis e (d) o número de revoluções desde o repouso até o que a lecha deve ter? (b) O ponto entre o eixo e a borda da roda instante em que o disco ainge uma velcidade anular de 10 revis.

por onde a lecha passa faz aluma diferença? Caso a resposta seja •• 15 Uma roda tem uma aceleração angular consante de 3,0 rad/s2•

airmativa, para que ponto você deve mirar?

Durante um certo intervalo de 4,0 s, descreve um ângulo de 120 rad.

•••8 A aceleração angular de uma roda é *a* = 6,0t4 -4,0t2, com *a* Supondo que a roda partiu do repouso, por quanto tempo já estava em radianos por segundo ao quadrado e tem segundos. No instante em movimento no início deste intervalo de 4,0 s?

PARTE 1

ROTAÇÃO

••16 Um carrossel gira a partir do repouso com uma aceleração em tono desse eixo.) (b) Qual é a velocidade linear v desse ponto?

angular de 1,50 rad/s2• Quanto tempo leva para executar (a) as pri Qual é o valor (c) de w e (d) de v para um ponto no equador?

meiras 2,00 revoluções e b) as 2,00 revoluções seguintes?

••26 O volante de uma máquina a vapor gira com uma velocidade

••17 Em *t* = O, uma roda tem uma velcidade angular de 4,7 rad/ angular constante de 150 rev/mn. Quando a máquina é desligada, s, uma aceleração angular consnte de -0,25 rad/s2 e uma reta de o arito dos mancais e a resistência do ar param a roda em 2,2 h. (a) referência em 8 *0* = O. (a) Qual é o maior ângulo 811x descrito pela Qual é a aceleração angular constante da roda, em revoluções por reta de referência no sentido posiivo? Qual é (b) o primeiro e (c) o minuto ao quadrado, durante a desaceleração? (b) Quantas revolusegundo instante no qual a reta de referência passa pelo ângulo 8 = ções a roda execua antes de parar? (c) No instante em que a roda 8má/2? Em que (d) insnte negativo e (e) instante posiivo a reta de está girando a 75 rev/min, qual é a componente tangencial da acereferência passa pelo ângulo *8* = 10,5 rad? (f) Faça um gráico de *8* leração linear de uma partícula da roda que está a 50 cm do eixo de em função de t e indique as resposas dos itens (a) a (e) no gráico.

rotação? (d) Qual é o módulo da aceleração linear total da partícula

do item (c)?

Seção 10-s Relações entre as Variáveis Lineares e

••27 O prato de um toca-discos está girando a 33t rev/min. Uma

Angulares

semente de melancia está sobre o prato a 6,0 cm de distância do

•18 Se a hélice de um avião gira a 2000 rev/min quando o avião eixo de rotação. (a) Calcule a aceleração da semente, supondo que voa com uma velocidade de 480 km/h em relação ao solo, qual é a ela não escorrega. (b) Qual é o valor mínimo do coeiciente de atrito velocidade escalar linear de um ponto na ponta da hélice, a 1,5 m de estático entre a semente e o prato para que a semente não escorredisância do eixo, em relação (a) ao piloto e b) a um observador no gue? (c) Supoha que o prato atinge a velocidade angular inal em solo? A velocidade do avião é paralela ao eixo de roação da hélice. 0,25 s, partindo do repouso com aceleração constante. Calcule o menor coeiciente de atrito esático necessário para que a semente

•19 Qual é o módulo (a) da velocidade angular, (b) da aceleração não escorregue durante o período de aceleração.

radial e (c) da aceleração tangencial de uma nave espacial que faz

uma curva circular com 3220 km de raio a uma velocidade de 29.000
••28 Na Fig. 10-28, una roda *A*

/h?

de raio rA = 10 cm está acoplada

por uma correia *B* a uma roda *C* de

•20 Um objeto gira em tono de um eixo ixo e a posição angular de raio *r* e = 25 cm. A velocidade anuna rea de referência sobre o objeto é dada por *8 = 0,40e1,* onde gular da roda *A* é aumentada a par-8 está em radianos e tem segundos. Considere um ponto do objeto tir do repouso a uma taxa constante situado a 4,0 cm do eixo de roação . Em *t* = O, qual é o módulo (a)

de 1,6 rad/s2• Determine o tempo

da componente ngencial e b) da componente radial da acelração necessário para que a roda *e* atinja Figura 10-28 Problema 28.

do ponto?

uma velocidade angular de 100 revi

•21

- Enre 1911 e 1990, o alto da torre inclinada de Pisa, min, supondo que a correia não desliza. *(Sugesão:* se a correia não Itália, se deslocou para o sul a uma taxa média de 1,2 mm/ano. A desliza, as velocidades lineares das bordas dos discos são iguais.) torre tem 55 m de altura. Qual é a velocidade angular média do alto ••29 Um método tradicional para medir a velocidade da luz utiliza da tore em relação à base em radianos por segundo?

uma roda dentada giratória. Um feixe de luz passa pelo espaço entre

•22 Um astronauta está sendo testado em uma centrífuga. A cen dois dentes situados na borda da roda, como na Fig. 10-29, viaja trífuga tem um raio de 10 me, partindo do repouso, gira de acordo até um espelho distante e chega de volta à roda exatamente a tempo com a equação *8* = 0,30t2, onde *t* está em segundos e *8* em radianos. de passar pelo espaço seguinte entre dois dentes. Uma dessas rodas No instante *t* = 5,0 s, qual é o módulo (a) da velocidade angular, tem 5,0 cm de raio e 500 espaços enre dentes. Medidas realizadas (b) da velocidade linear, (c) da aceleração tangencial e (d) da ace quando o espelho está a uma distância *L* = 500 m da roda foneleração radial do astronauta?

cem o valor de 3,0 X 105 km/s para a velocidade da luz. (a) Qual é

•23 Uma roda com um diâmetro de 1,20 m está girando com uma a velocidade angular (constante) da roda? b) Qual é a velocidade velocidade angular de 200 rev/min. (a) Qual é a velocidade angu linear de um ponto da borda da roda?

lar da roda em rad/s? (b) Qual é a velocidade linear de um ponto

na borda da roda? (c) Que aceleração angular consnte (em revoluções por minuto ao quadrado) aumenta a velocidade angular da roda para 1000 rev/min em 60,0 s? (d) Quantas revoluções a roda

L

executa nesses 60,0 s?

•24 Um disco de vinil funciona girando em tono de um eixo, de

modo que um sulco, aproximadamente circular, desliza sob una

Feixe

agulha que ica na extremidade de um braço mecânico. Saliências

de luz

do sulco passam pela agulha e a fazem oscilar. O equipamento con

Fonte

!

'

spelho

verte essas oscilações em sinais elétricos, que são ampliicados e

lurriinosa

perpendicular

transformados em sons. Suponha que um disco de vinil gira a 33}

•

ao feixe de luz

rev/min, que o sulco que está sendo tocado está a uma distância de

10,0 cm do cenro do disco e que a distância média entre as saliências do sulco é 1,75 mm. A que taxa (em toques por segundo) as Roda

dentada

saliências aingem a agulha?

••25 (a) Qual é a velocidade angular w em tono do eixo polar de

um ponto da superície da Terra na latitude 40º N? (A Terra gira Figura 10-29 Problema 29.

••30 Uma roda de um giroscópio com 2,83 cm de raio é acelerada

Eixo

a partir do repouso a 14,2 rad/s2 até atingir uma velocidade angular

de 2760 rev/min. (a) Qual é a aceleração tangencial de um ponto da

borda da roda durante o processo de aceleração angular? (b) Qual é

a aceleração radial deste ponto quando a roda esá girando na velocidade máxima? (c) Qual é a distância percorrida por um ponto da borda da roda durane o de aceleração angular?

[illegible]

) [illegible] t__J

••31 Um disco com 0,25 m de raio deve girar como um carrossel

0,1

0,2

de um ângulo de 80 rad, partindo do repouso, ganhando velocidade

***h* (m)**

angular a uma axa consante a nos primeiros 400 rad e, em seguida,

I

(a)

(b)

perdendo velocidade angular a uma axa consane -a1 até icar novamente em repouso. O módulo da aceleração cenríeta de qualquer Figura 10-31 Problema 36.

parte do disco não deve exceder 400 m/s2• (a) Qual é o menor tempo

necessário para a roação? (b) Qual é o valor correspondente de *a* ? •37 Calcule o momento de inércia de uma régua de um mero, com 1

uma massa de 0,56 kg, em relação a um eixo perpendicular à régua

•••32 Um pulsar é uma estrela de nêutrons que gira rapidamente na marca de 20 cm. (Trate a régua como uma barra ina.) em tomo de si mesma e emite um feixe de rádio, do mesmo modo

como um farol emite um feixe luminoso. Recebemos na Terra um •38 A Fig. 10-32 mosra três partículas de 0,0100 kg que foram pulso de rádio para cada revolução da estrela. O período *T* de rota coladas em uma barra de comprimento *L* = 6,00 cm e massa despre

ção de um pulsar é determinado medindo o intervalo de tempo en zível. O conjunto pode girar em tomo de um eixo perpendicular que re os pulsos. O pulsar da nebulosa do Caranguejo tem um período passa pelo ponto *O,* situado na exremidade esquerda. Se removemos de rotação *T* = 0,033 s que está aumentando a uma taxa de 1,26 X uma das partículas (ou seja, 33% da massa), de que porcentagem 10·5 s/ano. (a) Qual é a aceleração angular *a* do pulsar? b) Se *a* se o momento de inércia do conjunto em relação ao eixo de rotação mantiver constante, daqui a quantos anos o pulsar vai parar de girar? diminui se a partícula removida é (a) a mais próxima do ponto *O* e (c) O pulsar foi criado pela explosão de uma supemova observada (b) a mais distante do ponto *O?*

no ano de 1054. Supondo que a aceleração *a* se manteve constante,

determine o período T logo após a explosão.

-

.

L - -·I

1

Eixo

Seção 10-& Energia Cinétia de Rotação

o

•33 Calcule o momento de inércia de uma roda que possui uma

energia cinética de 24.400 J quando gira a 602 rev/min.

Figura 10-32 Problemas 38 e 62.

•34 A Fig. 10-30 mostra a velocidade angular em função do tempo

para uma barra na que gira em tono de uma das exremidades. A

escala do eixo eu é deinida por eu, = 6,0 rad/s. (a) Qual é o módulo • •39 Alguns caminhões utilizam a energia armazenada em um da aceleração angular da barra? (b) Em *t* = 4,0 s, a barra tem uma volante que um motor elétrico acelera até uma velocidade de 200T

energia cinética de 1,60 J. Qual é a energia cinéica da barra em rad/s. Um desses volantes é um cilindro homogêneo com uma massa

***t* = O?**

de 500 kg e um raio de 1,0 m. (a) Qual é a energia cinética do volante

quando está girando com a velocidade máxima? b) Se o caminhão

***w* (rad/s)**

desenvolve uma potência média de 8,0 kW, por quantos minutos

pode operar sem que o volante seja novamente acelerado?

••40 A Fig. 10-33 mostra um arranjo de 15 discos iguais colados

para formar uma barra de comprimento *L* = 1,0000 m e massa total

***M* = 100,0 mg. O arranjo pode girar em tomo de um eixo perpendicular que passa pelo disco central no ponto *O.* (a) Qual é o momento de**

inércia do conjunto em relação a esse eixo? (b) Se considerarmos

O [illegible] -+ - -I *t* (s)

[illegible]

o arranjo como uma barra aproximadamente homogênea de massa

- '

Figura 10-30 Problema 34.

1

***M e* comprimento *L*, que erro percentual estaremos cometendo se usarmos a fórmula da Tabela 10-2e para calcular o momento de**

inércia?

Seção *10-1* Cálculo do Momento de Inércia

•35 Dois cilindros homogêneos, ambos girando em tomo do respectivo eixo central (longitudinal) com uma velocidade angular de 235 rad/s, têm a mesma massa de 1,25 kg e raios diferentes. Qual é

a energia cinéica de rotação (a) do cilindro menor, de raio 0,25 m,

o

e b) do cilindro maior, de raio 0,75 m?

Figura 10-33 Problema 40.

•36 A Fig. 10-31a mosra um disco que pode girar em torno de um

eixo perpendicular à sua face a uma disância *h* do centro do disco. ••41 Na Fig. 10-34, duas partículas, ambas de massa *m* = 0,85 kg, A Fig. 10-31b mostra o momento de inércia Ido disco em relação ao estão ligadas uma à outra, e a um eixo de rotação no ponto *O*, por eixo em função da

distância *h*, do centro até a borda do disco. A es duas barras inas, ambas de comprimento *d* = 5,6 cm e massa *M* =

cala do eixo I é deinida por IA = 0,050 kg · m2 e *18* = O, 150 kg · m2• 1,2 kg. O conjunto gira em tono do eixo de rotação com velocida

Qual é a massa do disco?

de angular eu = 0,30 rad/s. Determine (a) o momento de inércia do

ω
d
M
m
d
M
Eixo de rotação

a

θ_2
$\vec{F}_2$

θ_1
$\vec{F}_1$
$\vec{r}_1$

$\vec{r}_2$

$\vec{F}_A$
A

$\vec{F}_C$
C
160°
O
90°
$\vec{F}_B$
B

R

conjunto em relação ao ponto *O* e b) a energia cinética do conjunto.

135º

----

m

o

Figua 10-34 Problema 41.

Figura 10-37 Problema 46.

••42 As massas e coordenadas de quatro parículas são as seguin •47 Uma pequena bola de massa 0,75 kg está presa a uma das tes:

extremidades de uma barra de 1,25 m de comprimento e massa

***50* g, *x* = 2,0 cm, *y* = 2,0 cm; 25 g, *x* = O, *y* = 4,0 cm; 5 g,**

***x* = -3,0 cm, *y* = -3,0 cm; 30 g, *x* = -2,0 cm, *y* = 4,0 cm. Qual é desprezível. A oura extremidade da barra está pendurada em um o momento de inércia do conjunto em relação ao eixo (a)x,**

eixo. Qual é o módulo do torque exercido pela força ravitacional

b) *y* e (c)

***z?* (d) Suponha que as resposas de (a) e**

em relação ao eixo quando o pêndulo assim formado faz um ângulo

b) sejam *A eB,* respecivamente. Nesse caso, qual é a resposta de (c) em termos de *A* e *B?*

de 30º com a vertical?

••43

•48 O comprimento do braço do pedal de uma bicicleta é 0,152

O bloco homogêneo da Fig. 10-35 tem massa 0,172 kg e lados *a* = 3,5 cm, *b* = 8,4 cm e *e* = 1,4 cm. Calcule o momento de m e uma força de 111 N é aplicada ao pedal pelo ciclista. Qual é inércia do bloco em relação a um eixo que passa por um canto e é o módulo do torque em relação ao eixo do braço do pedal quando perpendicular às faces maiores.

o braço faz um ângulo de (a) 30º, (b) 90 e (c) 180º com a vertical?

Eixo de

oação-1

Seção 10·9 A Segunda Lei de Newton para Rotações

b-

1

–

•49 No início de um salto de trampolim, a velocidade angular de

e

-t

uma mergulhadora em relação a um eixo que passa pelo centro de

massa varia de zero a 6,20 rad/s em 220 ms. O momento de inércia

em relação ao mesmo eixo é 12,0 kg · m2• Quais são os módulos

(a) da aceleração angular média da mergulhadora e (b) do torque

exteno médio exercido pelo trampolim sobre a mergulhadora no

Figura 10-35 Problema 43.

início do salto?

•50 Se um torque de 32,0 N · m exercido sobre uma roda produz

••44 Quaro partículas iguais de massa 0,50 kg cada uma são co uma aceleração angular de 25,0 rad/s2, qual é o momento de inércia locadas nos vérices de um quadrado de 2,0 m X 2,0 m e mantidas da roda?

nessa posição por quaro baras de massa desprezível, que formam

os lados do quadrado. Qual é o momento de inércia desse corpo í ••51 Na Fig. 10-38, o bloco 1 tem massa m, = 460 g, o bloco 2

gido em relação a um eixo que (a) está no plano do quadrado e pas tem massa *m2 = 50* g, e a polia, que está monada em um eixo h o sa pelos pontos médios de dois lados opostos, rizontal com arito desprezível, tem um raio *R* = 5,00 cm. Quando

b) passa pelo ponto

médio de um dos lados e é perpendicular ao plano do quadrado e o sistema é liberado a parir do repouso, o bloco 2 cai 75,0 cm em (c) está no plano do quadrado e passa por duas parículas diagonal 5,00 s sem que a corda deslize na borda da polia. (a) Qual é o mómente oposas?

dulo da aceleração dos blocos? Qual é o valor (b) da tensão *T2* e (c)

da tensão *T,?* (d) Qual é o módulo da aceleração angular da polia?

Seção 1 o-a T orque

(e) Qual é o momento de inércia da polia?

•45 O corpo da Fig. 10-36 pode girar em torno de u m eixo perpendicular ao papel passando por *O* e está submetido a duas forças, como mosra a igura. Se *r1* = 1,30 m, *r2* = 2,15 m, *F,* = 4,20 N, *F2* = 4,90 N, *e,* = 75,0º e J2 = 60,0º, qual é o torque resultante em relação ao eixo?

o

Figura 10-38 Problemas 51 e 83.

Figura 10-36 Problema 45.

••52 Na Fig. 10-39, um cilindro com uma massa de 2,0 kg pode

girar em torno do eixo cenral, que passa pelo ponto *O.* As forças

•46 O corpo da Fig. 10-37 pode girar em torno de um eixo que mostradas têm os seguintes módulos: F =

=

1

6,0 N, *F2* 4,0 N,

passa por *O* e é perpendicular ao papel e está submetido a rês for *F3* = 2,0 N e F4 = 5,0 N. As distâncias radiais são *r* = 5,0 cm e ças: *F1* = 10 N no ponto *A,* a 8,0 m de *O; F8* = 16 N emB, a 4,0 m *R* = 12 cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação da acelerade *O;* e Fc = 19 N em *C,* a 3,0 m de *O.* Qual é o torque resultante ção angular do cilindro. (Durante a rotação, as forças mantêm os em relação a *O?*

mesmos ângulos em relação ao cilindro.)

L_1

CAPÍTULO 1 O

••55 Na Fig. 10-42a, uma placa de plástico de forma irregular,

com espessura e massa especíica (massa por unidade de volume)

uniformes, gira em tomo de um eixo perpendicular à face da placa

passando pelo ponto *O.* O momento de inércia da placa em tono

R

desse eixo é medido usando o seguinte método: um disco circular

de massa 0,500 kg e raio 2,00 cm é colado na placa, com o centro

Eixo de

coincidindo com *O* (Fig. 10-42b). Um barbante é enrolado na borda

[illegible]

do disco como se o disco fosse um pião e puxado durante 5,00 s.

-

Em consequência, o disco e a placa são submetidos a uma força

constante de 0,400 N, aplicada pelo barbante tangencialmente à

Fg

borda do disco. A velocidade angular resultante é 114 rad/s. Qual é

o momento de inércia da placa em relação ao eixo?

Figura 10-39 roblema 52.

Placa

o

• •53 A Fig. 10-40 mosra um disco homogêneo que pode girar em

Eixo

torno do centro como um carrossel. O disco tem um raio de 2,00

cm e uma massa de 20,0 gramas e está inicialmente em repouso. A

(a)

partir do instante *t* = O, duas forças devem ser aplicadas angencialmente à borda do disco, como mostra a igura, para que, no instante Disco

***t* = 1,25 s, o disco tenha uma velocidade angular de 250 rad/s no**

-

sentido ani-horário. A força ; tem um módulo de 0,100 N. Qual é

o módulo de *F*

Barbante

2?

Figura 10-42 Problema 55.

(b)

••56 A Fig. 10-43 mostra as parículas 1 e 2, ambas de massa *m*,

presas às extremidades de uma barra rígida de massa desprezível

Figura 10-40 roblema 53.

e comprimento L1 + L2, com L1 = 20 cm e Li = 80 cm. A barra é

mantida horizontalmente no fulcro até ser liberada. Qual é o módulo

da aceleração inicial (a) da partícula 1 e (b) da partícula 2?

••54

" Em uma rasteira do judô, você tira o apoio do pé

esquerdo do adversário e, ao mesmo tempo, puxa seu quimono

para o lado sem apoio. Em consequência, o lutador gira em tono

do pé direito e cai no tatame. A Fig. 10-41 mosra um diarama

•

• 2

simpliicado do lutador,já com o pé esquerdo fora do chão. O eixo

de rotação passa pelo ponto *O*. A força gravitacional F, age sobre Figura 10-43 Problema 56.

o centro de massa do lutador, que está a uma distância horizontal

***d* = 28 cm do ponto *O*. A massa do lutador é 70 kg e o momento •• •57 Uma polia, com um momento de inércia de 1,0 X 10-3 kg ·**

de inércia em relação ao ponto *O* é 65 kg · m2

m2 em relação ao eixo e um raio de 10 cm, é submetida a uma força

• Qual é o módulo

da aceleração angular inicial do lutador em relação ao ponto *O* se aplicada tangencialmente à borda. O módulo da força varia no tempo o puxão F

de acordo com a equação $F = 0{,}50t$ + 0,30t2, com F em newtons e

0 que você aplica ao quimono (a) é desprezível e (b) é

horizontal, com um módulo de 300 N e aplicado a uma altura $h = t$ *em* segundos. A polia está inicialmente em repouso. Qual é (a) a 1,4m?

aceleração angular e (b) a velocidade angular da polia no insante

t = 3,0 s?

Seão 10-10 Trabalho e Energia Cinétia de Rotaão

.

•58 (a) Se R = 12 cm, M = 400 g *e* m = 50 g na Fig. 10-18, d e termine a velocidade do bloco após ter descido 50 cm a partir do

•--->F^a

.

repouso. Resolva o problema usando a lei da conservação da ener

CM

gia. (b) Repita o item (a) para R = 5,0 cm.

•59 O virabrequim de um automóvel transfere energia do motor

'

para o eixo a uma xa de 100 hp (= 74,6 kW) quando gira a 1800

g

rev/min. Qual é o torque (em newtons-meros) exercido pelo vira

h

brequim?

•60 Uma barra ina de 0,75 m de comprimento e uma massa de

0,42 kg está suspensa por uma das exremidades. A barra é puxada para o lado e liberada para oscilar como um pêndulo, passando *o*

L

pela posição mais baixa com uma velocidade angular de 4,0 rad/s.

Desprezando o arito e a resistência do ar, determine (a) a energia

f *d* -

cinética da barra na posição mais baixa e (b) a altura acima dessa

Figura 10-41 Problema 54.

posição que o cenro de massa alcança.

PARTE 1

ROTAÇÃO

•61 Uma roda de 32,0 kg, essencialmente um aro no com 1,20 m da bara. Supondo que a energia fonecida ao sistema pelo pequeno de raio, está girando a 280 rev/min. A roda precisa ser parada em empurrão é desprezível, qual é a velcidade angular do conjunto ao 15,0 s . (a) Qual é o trabalho necessário para fazê-la parar? b) Qual passar pela posição inverida (de cabça para baixo)?

é a potência média necessária?

••62 Na Fig. 10-32, três partículas de 0,0100 kg foram coladas

em uma barra, de comprimento *L* = 6,00 cm e massa desprezível,

Aro

que pode girar em torno de um eixo perpendicular que passa pelo

ponto *O* em uma das extremidades. Determine o rabalho necessário

para mudar a velocidade angular (a) de O para 20,0 rad/s, b) de 20,0

Barra

rad/s para 40,0 rad/s e (c) de 40,0 rad/s para 60,0 rad/s. (d) Qual é a

Eixo de

inclinação da curva da energia cinética do conjunto (emjoules) em
Figura 10-45 Problema 67.

rotação

função do quadrado da velocidade angular (em radianos quadrados

por segundo ao quadrado)?

••63 Uma régua de um metro é mantida verticalmente com uma
Problemas dicíonaís

das extremidades apoiada no solo e depois liberada. Determine a 68
Duas esferas homogêneas maciças têm a mesma massa de 1,65

velocidade da oura extremidade pouco antes de tocar o solo, supon kg,
mas o raio de uma é 0,226 m e o da outra é 0,854 m. Ambas podo que a
extremidade de apoio não escorrega. *(Sugestão:* considere dem girar em
tomo de um eixo que passa pelo centro. (a) Qual é o a régua uma barra
ina e use a lei de conservação da energia.)

módulo *T* do torque necessário para levar a esfera menor do repouso

••64 Um cilindro homogêneo com 10 cm de raio e uma massa de a uma velocidade anular de 317 rad/s em 15,5 s? (b) Qual é o mó20 kg está monado de modo a poder girar livremente em tomo de dulo *F* da força que deve ser aplicada angencialmente ao equador um eixo horizontal paralelo ao eixo central longitudinal do cilindro da esfera para produzir esse torque? Quais é o valor correspondente e situado a 5,0 cm do eixo. (a) Qual é o momento de inércia do c i de (c) T e (d) *F* para a esfera maior?

lindro em relação ao eixo de rotação? (b) Se o cilindro é liberado a 69 Na Fig. 10-46, um pequeno disco de raio *r* = 2,00 cm foi copartir do repouso com o eixo central longiudinal na mesma altura lado na borda de um disco maior de raio *R* = 4,00 cm, com os disque o eixo em tono do qual pode girar, qual é a velocidade anular cos no mesmo plano. Os discos podem girar em tomo de um eixo do cilindro ao passar pelo ponto mais baixo da trajetória?

perpendicular que passa pelo ponto *O,* situado no cenro do disco

•••65

[illegible] Uma chaminé cilíndrica cai quando a base sofre um maior. Os discos têm uma massa especíica (massa por unidade de abalo. Trate a chaminé como uma barra ina com 55,0 m de compri volume) uniforme de 1,40 X 103 kg/m3 e uma espessura, também mento. No instante em que a chaminé faz um ângulo de 35,0º com uniforme, de 5,00 mm. Qual é o momento de inércia do conjunto a vertical durante a queda, qual é (a) a aceleração radial do topo e dos dois discos em relação ao eixo de rotação que passa por *O?***

(b) a aceleração angencial do topo? *(Sugestão:* use considerações

de energia e não de torque.) (c) Para que ânulo J a aceleração tangencial é iual a *g?*

•••66 Uma casca esférica homogênea de massa *M* = 4,5 kg e raio

R = 8,5 cm pode girar em tono de um eixo verical sem arito Fig.

10-44). Uma corda de massa desprezível está enrolada no equador

da casca, passa por uma polia de momento de inércia I = 3,0 X Figura 10-46 Problema 69.

10-3 kg · m2 e raio r = 5,0 cm e está presa a um pequeno objeto de

massa m = 0,60 kg. Não há atrito no eixo da polia e a corda não 70 Uma roda partiu do repouso com uma aceleração anular consescorrega na casca nem na polia. Qual é a velocidade do objeto de tante de 2,00 rad/s2• Durante um certo intervalo de 3,00 s, a roda pois de cair 82 cm após ter sido liberado a partir do repouso? Use descreve um ângulo de 90,0 rad. (a) Qual era a velocidade angular considerações de energia.

da roda no início do intervalo de 3,00 s? (b) Por quanto tempo a

roda girou antes do início do intervalo de 3,00 s?

M, R

71 Na Fig. 1047, dois blocos de 6,20 kg estão ligados por uma

corda de massa desprezível que passa por uma polia de 2,40 cm de

raio e momento de inércia 7,40 X 10-• kg · m2• A corda não es

o

correga na polia; não se sabe se existe atrito enre a mesa e o bloco

que escorega; não há atrito no eixo da polia. Quando o sisema é

liberado a parir do repouso, a polia gira de 0,650 rad em 91,0 ms

e a aceleração dos blocos é consante. Determine (a) o módulo da

aceleração anular da polia, (b) o módulo da aceleração de cada

m

bloco, (c) a tensão *T,* da corda e (d) a tensão *T2* da corda.

Figura 10-44 Problema 66.

• • •67 A Fig. 10-45 mosra um corpo rígido formado por um aro ino

(de massa m e raioR = 0,150m) e uma bara ina radial (de massam

e comprimento *L* = 2,0R). O conjunto está na verical, mas se recebe

um pequeno empurrão, comça a girar em tomo de um eixo horizon-

al no plano do aro e da barra, que passa pela exremidade inferior
Figura 10-47 Problema 71.

72 Nas duas exremidades de uma na barra de aço com 1,20 m de 77 Um prato de toca-discos, que está girando a 33t rev/min, dicomprimento e 6,40 kg de massa existem pequenas bolas de massa minui gradualmente de velocidade e para 30 s depois que o motor 1,06 kg. A barra pode girar em um plano horizonal em tomo de um é desligado. (a) Determine a aceleração anular do prato (suposta eixo vertical que passa pelo ponto médio da barra. Em um certo ins consante) em revoluções por minuto ao quadrado. (b) Quanas r e tante, a barra está girando a 39,0 revis. Devido ao arito, desacelera voluções o prato executa até parar?

até parar, 32,0 s depois. Supondo que o torque produzido pelo atrito 78 Um corpo rígido é formado por três barras inas iguais, de com

é constante, calcule (a) a aceleração angular, (b) o torque produzido primento *L* = 0,600 m, unidas na forma da lera H (Fig. 10-49). O

pelo atrito, (c) a energia ransferida de energia mecânica para energia corpo pode girar livremente em tono de um eixo horizonal que térmica pelo arito e (d) o número de revoluções executadas pela coincide com

uma das penas do H. O corpo é liberado a parir do barra nesses 32,0 s. (e) Suponha que o torque produzido pelo atrito repouso em uma posição na qual o plano do H esá na horizontal.

não é consante. Se alguma das grandezas calculadas nos itens (a), Qual é a velocidade angular do corpo quando o plano do H está na (b), (c) e (d) ainda puder ser calculada sem qualquer informação vertical?

adicional, foneça o seu valor.

73 Uma pá do rotor de um helicóptero é homogênea, tem 7,80 m

de comprimento, una massa de 110 kg e está presa ao eixo do rotor

por um único parafuso. (a) Qual é o módulo da força exercida pelo

eixo sobre o parafuso quando o rotor está girando a 320 rev/nin?

***(Sugestão:* para este cálculo, a pá pode ser considerada una mas Figura 10-49 Problema 78.**

sa pontual localizada no centro de massa. Por quê?) (b) Calcule o

módulo do torque que deve ser aplicado ao rotor para que atinja a 79 (a) Mostre que o momento de inércia de um cilindro maciço velocidade angular do item anterior, a partir do repouso, em 6,70 s. de massa M e raio *R* em relação ao eixo cenral é [illegible] ao momento Ignore a resistência do ar. (A lâmina não pode ser considerada uma de inércia de um aro ino de massa *M* e raio *R* / .J 2 em relação ao massa pontual para este cálculo. Por quê? Suponha que a distribuição eixo central. (b) Mostre que o momento de inércia *I* de um corpo de massa é a de una barra ina homogênea.) (c) Qual é o trabalho qualquer de massa *M* em relação a qualquer eixo é iual ao momenrealizado pelo torque sobre a pá para que a pá atinja a velocidade to de inércia de um *aro equivalente* em tomo do mesmo eixo com anular de 320 rev/min?

a mesma massa *Me* um raio *k* dado por

74 ***Corrida de discos.*** **A Fig. 10-48 mostra dois discos que podem girar em tomo do centro como um carrossel. No instante *t* =**

k=ff.

O, as retas de referência dos dois discos têm a mesma orientação;

o disco *A* já está girando com una velocidade angular constante O raio *k* do aro quivalente é chamado de *raio de giração* do coro.

de 9,5 rad/s e o disco *B* parte do repouso com una aceleração an 80 Um disco gira, com aceleração angular constante, da posição gular consante de 2,2 rad/s2• (a) Em que instante *t* as duas retas angular 0

de referência têm o mesmo deslocamento angular *O?* (b) Esse é o

1 = 10,0 rad até a posição angular *02* = 70,0 rad em 6,00

s. A velocidade an

primeiro instante

ular em *02* é 15,0 rad/s. (a) Qual era a velocit, desde *t* = O, no qual as duas retas de referência dade angular em *O*

estão alinhadas?

1? (b) Qual é a aceleração angular? (c) Em que

posição angular o disco estava inicialmente em repouso? (d) Plote

--

O **em unção de *t* e a velocidade angular eu do disco em função de *t,***

--- a partir do início do movimento *(t* = O).

81 A barra ina e homogênea da Fig. 10-50 tem 2,0 m de comprimento e pode girar, sem atrito, em tono de um pino horizonal que passa por una das extremidades. A barra é liberada a partir do

Figura 10-48 Problema 74.

Disco *A*

Disco *B*

repouso e de um ânulo O = 40º acima da horizontal. Use a lei de

conservação da energia para determinar a velocidade angular da

75

- Um equilibrista procura manter sempre seu centro de barra ao passar pela posição horizonal.

massa vericalmente acima do arame (ou corda). Para isso, carrega

muias vezes uma vara comprida. Quando se inclina, digamos, para

a direia (deslocando o centro de massa para a direia) e corre o risco

de girar em tono do arame, movimenta a vara para a esquerda, o

que desloca o centro de massa para a esquerda e diminui a velocidade de roação, proporcionando-lhe mais tempo para recuperar o equillbrio. Suponha que o equilibrista tem ua massa de 70,0 kg e Figura 10-50 Poblema 81.

um momento de inércia de 15,0 kg · m2 em relação ao arame . Qual

é o módulo da aceleração angular em relação ao arame se o cenro 82

George Washington Gale Feris, Jr., um engenheiro civil

de massa do equilibrisa esá 5,0 cm à direita do arame e (a) o equi formado pelo Instiuto Politécnico Rensselaer, construiu a primeira librista não carrega una vara e (b) a vara de 14,90 kg que carrega roda-gigante para a Exposição Mundial Colombiana de 1893, em é movimentada de tal forma que o cento de massa do equilibrista

Chicago. A roda, uma impressionante obra da engenharia para a fica 10 cm à esquerda do arame?

época, movimentava 36 cabinas de madeira, cada uma com capa76 Um roda começa a girar a partir do repouso em *t* = O com acele cidade para 60 passageiros, ao longo de una circunferência com 76

ração angular constante. No instante *t* = 2,0 s, a velocidade anular m de diâmetro. As cabinas eram carregadas 6 de cada vez, e quando da roda é 5,0 rad/s. A aceleração cessa abruptamente no insante *t* = as 36 cabinas estavam ocupadas, a roda executava uma revolução 20 s. De que ângulo gira a roda no intervalo de *t* = O a *t* = 40 s?

completa, com velocidade anular constante, em cerca de 2 *in.*

PARTE 1

ROTAÇÃO

23

Estime o trabalho necessário para a máquina fazer girar apenas os

.

passageiros.

83 Na Fig. 10-38, dois blocos, de massas m1 = 400 g e [illegible] = 60 g,

esão ligados por uma corda de massa desprezível que está enrolada

na borda de um disco homogêneo de massa *M* = 500 g e raio *R* =

12,0 cm. O disco pode girar sem atrito em tono de um eixo hori Figura 10-52 Problema 87.

zontal que passa pelo cenro; a corda não desliza na borda do disco.

O sistema é liberado a parir do repouso. Determine (a) o m6dulo 88 Uma casca esférica ina tem um raio de 1,90 m. Um torque aplida aceleração dos blocos, (b) a tensão T da corda da esquerda e (c) cado de 960 N · m produz uma aceleração angular de 6,20 rad/s2

a tensão

em relação a um eixo que passa pelo cenro da casca. Quais são (a)

***T* da corda da direita.**

***2* '**

=

o momento de inércia da casca em relação a esse eixo e (b) a massa

84

As 7h14min de 30 de junho de 1908, uma enorme ex-da casca?

plosão aconteceu na atmosfera sobre a Sibéria Central, na laitude

61 º N e longitude 102º E; a bola de fogo criada pela explosão foi o 89 Um ciclista de 70 kg apoia toda a sua massa em cada movimento objeto mais brilhante visto na Terra antes das armas nucleares. O para baixo do pedal enquanto pedala em uma estrada ngreme. Suchamado pondo que o diâmetro da circunferência descita pelo pedal é 0,40

***Evento de Tungusa,* que, de acordo com uma testemunha,**

"cobriu uma parte enorme do céu", foi provavelmente a explosão m, determine o módulo do torque máximo exercido pelo ciclista em de um

relação ao eixo de roação dos pedais.

***asteroide rochoso* de aproximadamente 140 m de largura. (a)**

Considerando apenas a rotação da Terra, determine quanto tempo 90 O volante de um motor está girando a 25,0 rad/s. Quando o depois o asteroide teria que chegar à Terra para explodir acima de motor é desligado, o volante desacelera a uma axa constante e para Helsinki, na longitude 25º E, destruindo totalmente a cidade. (b) em 20,0 s. Calcule (a) a aceleração angular do volante, (b) o ângulo Se o asteroide fosse um

asteroide metálico, poderia ter chegado descrito pelo volante até parar e (c) o número de revoluções reali

à superfície da Terra. Quando tempo depois o asteroide teria que zadas pelo volante até parar.

chegar à Terra para que o chque ocorresse no oceano Atlântico, na 91 Na Fig. 10-18a, uma roda com 0,20 m de raio está montada longitude 20º W? (A sunami resultante desruiria cidades costeiras em um eixo horizontal sem atrito. O momento de inércia da roda dos dois lados do Atlânico.)

em relação ao eixo é 0,40 kg · m2• Uma corda de massa desprezí85 Uma bola de golfe é lançada com um ângulo de 20º em relação vel, enrolada na borda da roda, está presa a uma caixa de 6,0 kg.

à horizontal, uma velocidade de 60 m/s e uma velocidade angular O sistema é liberado a partir do repouso. Quando a caixa tem uma de 90 rad/s. Desprezando a resistência do ar, determine o número de energia cinéica de 6,0 J, quais são (a) a energia cinética de rotação revoluções que a bola executa até o instante em que atinge a altura da roda e (b) a distância percorrida pela caixa?

' .

max1ma.

92 O Sol esá a 2,3 X 104 anos-luz do centro da Via Láctea e des86 A Fig. 10-51 mosra um objeto plano formado por dois anéis creve uma circunferência em torno deste centro a uma velocidade circulares que têm um cenro comum e são mantidos ixos por rês de 250 km/s. (a) Quanto tempo leva para o Sol executar uma revobarras de massa desprezível. O objeto, que está inicialmente em re lução em tono do centro da galáxia? (b) Quanas revoluções o Sol pouso, pode girar (como um carrossel) em torno do centro comum, completou desde que se formou, há cerca de 4,5 X 109 anos?

onde se encona oura bara de massa desprezível. As massas, raios 93 Uma roda de 0,20 m de raio está monada em um eixo horizonintenos e

raios extenos dos anéis aparecem na tabela a seguir. Uma tal sem arito . O momento de inércia da roda em relação ao eixo é força tangencial de módulo 12,0 N é aplicada à borda extena do 0,050 kg · m2• Uma corda de massa desprezível está enrolada na anel exteno por 0,300 s. Qual é a variação na velocidade angular roda e presa a um bloco de 2,0 kg que escorrega em uma superído objeto nesse intervalo de tempo?

cie horizontal sem atrito. Se uma força horizontal de módulo *P* =

3,0 N é aplicada ao bloco, como na Fig. 10-53, qual é o módulo da

aceleração angular da roda? Suponha que a corda não desliza em

relação à roda.

- *p*

Figura 10-51 Problema 86.

Figura 10-53 Problema 93.

Anel

Massa (kg)

Raio inteno (1)

Raio externo (m)

94 Um carro parte do repouso e se move em uma pista circular com

1

0.120

O.OI 0

[illegible]

30,0 m de raio . A velocidade do carro aumena a uma axa constante

2

0.240

0.090

0.140

de 0,50 m/s2• (a) Qual é o módulo da aceleração linear *édia* do

carro após 15,0 s? (b) Que ângulo o vetor aceleração média faz com

a velocidade do carro nesse instante?

87 Na Fig. 10-52, uma roda com 0,20 m de raio é montada em 95 O corpo rígido mostrado na Fig. 10-54 é formado por rês parum eixo horizontal sem arito. Uma corda de massa desprezível é tículas ligadas por barras de massa desprezível. O corpo gira em enrolada na roda e presa a uma caixa de 2,0 kg que escorrega sobre tono de um eixo perpendicular ao plano da rês partículas que pasuma superfície sem arito com uma inclinação 8 = 20º em relação à sa pelo ponto *P.* Se *M* = 0,40 kg, *a* = 30 cm e *b* = 50 cm, qual é o horizonal. A caixa escorrega para baixo com uma aceleração de 2,0 rabalho necessário para levar o corpo do repouso até a velocidade m/s2• Qual é o momento de inércia da roda em relação ao eixo?

angular de 5,0 rad/s?

100 Duas barras nas (ambas de massa 0,20 kg) esão unidas para

formar um corpo rígido, como mosra a Fig. 10-57. Uma das barras tem comprimento L1 = 0,40 m e a outra tem comprimento *i.* =

0,50 m. Qual é o momento de inércia deste corpo rígido em relação

b

b

(a) a um eixo perpendicular ao plano do papel passando pelo centro da barra menor e b) um eixo perpendicular ao plano do papel passando pelo centro da barra maior?

a

a

Figua 10-54 Problema 95.

2M

p

2M

96 *Engenhaia de embalagens.* A tampa com um anel de puxar

foi um grande avanço na engenharia das latas de bebida. O anel

gira em torno de um pino situado no centro da tampa. Quando um

dos lados do anel é puxado para cima, o ouro lado empurra para

baixo uma parte da tampa que foi riscada. Se você puxa o anel para

cima com uma força de 10 N, qual é, aproximadamente, o módulo

da força aplicada à parte riscada da ampa? *(Sugestão:* obtenha os
Figura 10-57 Problema 100.

-1 *L* -- - l *L* J

2 1

2 1 --

dados necessários em uma lata de verdade.)

1

97 A Fig. 10-55 mosra uma pá de hélice que gira a 2000 rev/min

em tomo de um eixo perpendicular passando pelo ponto *B.* O onto *A* 101 Na Fig. 10-58, quatro polias estão ligadas por duas coreias.

está na oura extremidade da pá, a uma distância de 1,50 m. (a) Qual A polia *A* (de 15 cm de raio) é a polia moriz e gira a 10 rad/s. A é a diferença enre os módulos da aceleração cenríeta a do ponto *A* polia *B* (de 10 cm de raio) esá ligada à polia *A* pela correia 1. A e de um ponto situado a O, 150 m de disância do eixo? b) Determine polia *B'* (de 5 cm de raio) é concêntrica com a polia *B* e esá rigidaa inclinação do grico de *a* em unção da disância ao longo da pá. mente ligada a ela. A polia *C* (de 25 cm de raio) esá ligada à polia

***B'* pela correia 2. Calcule (a) a velocidade linear de um ponto da**

A

B

correia 1, (b) a velocidade angular da polia *B,* (c) a velocidade angular da polia *B'*, (d) a velocidade linear de um ponto da correia 2

Figura 10.55 Problema 97.

e (e) a velocidade anular da polia C. *(Sugesão:* se a coreia enre

duas polias não desliza, as velocidades lineares das bordas das duas

polias são iuais.)

98 Um mecanismo em forma de ioiô, montado em um eixo horizontal sem atrito, é usado para levantar uma caixa de 30 kg, como mosa a Fig. 10-56. O raio externo *R* da roda é 0,50 m e o raio *r* do Correia 1

cubo da roda é 0,20 m. Quando uma força horizonal *F* constante

B'

de módulo 140 N é aplicada a uma corda enrolada na roda, a caixa, que está pendurada em uma corda enrolada no cubo, tem uma aceleração para cima de módulo 0,80 m/s2• Qual é o momento de

motriz

inércia do mecanismo em relação ao eixo de rotação?

- *F*

Suporte rígido

Figura 10-58 Problema 101.

ubo

-

da

102 O corpo rígido da Fig. 10-59 é formado por rês bolas e rês

roda r

barras de ligação, com *M* = 1,6 kg, *L* = 0,60 m e *J* = 30º. As bolas podem ser tratadas como partículas e as baras têm massa desprezí

R

vel. Determine a energia cinética de rotação do corpo se a velocidade

Mecanismo em

angular é 1,2 rad/s em relação (a) a um eixo que passa pelo ponto *P*

Corda

fonna de ioiô

e é perpendicular ao plano do papel e b) a um eixo que passa pelo

ponto *P,* é perpendicular à barra de comprimento 2L e está no plano

Figua 10-56 Problema 98.

do papel.

2M

99 Uma pequena bola com uma massa de 1,30 kg está montada

em uma das exremidades de uma barra de O, 780 m de comprimento

e massa desprezível. O sistema gira em um crculo horizontal em

p

2L

M

torno da oura extremidade da barra a 5010 rev/mín. (a) Calcule o

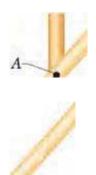
momento de inércia do sistema em relação ao eixo de roação. (b)

Existe uma força de arrasto de 2,30 X 10·2 N agindo sobre a bola,

no sentido oposto ao do movimento. Que torque deve ser aplicado

2M

ao sistema para mantê-lo em rotação com velocidade consante?

Figura 10-59 Problema 102.

PARTE 1

ROTAÇÃO

285

103 Na Fig. 10-60, una barra ina e homogênea (com 4,0 n de 104 Quatro parículas, todas de massa 0,20 kg, ocupam os vértices comprimento e una massa de 3,0 kg) gira livremente em tomo de de um quadrado com 0,50 m de lado. As partículas estão ligadas por um eixo horizontal *A* que é perpendicular à barra e passa por um baras de massa desprezível. Este corpo rígido pode girar em um ponto siuado a uma distância *d* = 1,0 m da extremidade da barra. plano vertical em tono de um eixo horizontal *A* que passa por una A energia cinética da barra ao passar pela posição verical é 20 J. das parículas. O corpo é liberado a partir do repouso com a barra (a) Qual é o momento de inércia da bara em relação ao eixo *A?* (b) *AB* na horizontal, como mosra a Fig. 10-61. (a) Qual é o momento Qual é a velocidade (linear) da exremidade *B* da barra ao passar de inércia do corpo em relação ao eixo *A?* (b) Qual é a velocidade pela posição vertical? (c) Em que ângulo J a barra para momenta angular do corpo em relação ao eixo *A* no instante em que a bara neamente?

***AB* passa pela posição vertical?**

t *d*

l

Eixo de

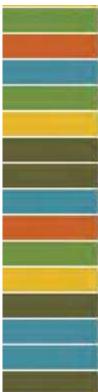
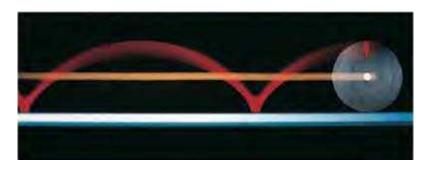
roação

A

B

Figura 10.61 Problema 104.

B

Figura 10-60 roblema 103.

C A P Í TU L O

RO LAM ENTO,

TO R U E E MOM ENTO

ANG U LAR

- O QUE É FÍSICA?

Como vimos no Capítulo 10, um dos objetivos da ísica é o estudo das

rotações. Enre as aplicações desse estudo, a mais importante é alvez a análise do

rolamento de rodas e objetos que se comportam como rodas. Esa aplicação da física vem sendo usada há muito tempo. Assim, por exemplo, quando os habitantes pré-históricos da ilha da Páscoa moveram gigantescas esátuas de pedra de uma pedreira para ouros lugares da ilha, eles as arrastaram sobre toras, que funcionaram como roletes. Mais tarde, quando os americanos colonizaram o oeste no século X,

ransportaram seus pertences primeiro em carroças e depois em vagões de rem. Hoje

em dia, gostemos ou não, o mundo está repleto de carros, caminhões, motocicletas,

bicicletas e ouros veículos sobre rodas.

A ísica e a engenharia do ransporte sobre rodas são tão anigas que alguém

poderia pensar que nada de novo resta para ser criado. Enretanto, as pranchas de

skate* e os patins *in-line* foram inventados e lançados recentemente no mercado e se Figura 11-1 O Segway. *(Justin

tomaram um rande sucesso. Um tipo modeno de carinho de rolimã, conhecido

Sullivan/Getty Images News and

como *street luge*, entrou na moda nos Estados Unidos, e veículos individuais como

Sport Services)

o Segway (Fig. 11-1) podem mudar a forma como as pessoas se movimentam nas

grandes cidades. As aplicações da física do rolamento ainda podem reservar muitas

surpresas e recompensas. Nosso ponto de parida para estudar essa parte da física

será simpliicar o movimento de rolamento.

1 1 -2 O Rolamento como uma Combinação de

Translação e Rotação

No momento, vamos considerar apenas objetos que *rolam suavemente* em uma

superfície, ou seja, que rolam sem escorregar ou quicar na superfície. A Fig. 11-2

mosra como o movimento de rolamento suave pode ser complicado: embora o cenro do objeto se mova em uma linha reta paralela à superfície, um ponto da borda certamente não o faz. Entretanto, podemos estudar este movimento ratando-o como

uma combinação de ranslação do centro de massa e rotação do resto do objeto em

tono do centro de massa.

Figura 11-2 Fotografia de longa exposição de um disco rolando. Pequenas lâmpadas foram presas ao disco, uma no centro e outra na borda. A segunda descreve uma curva chamada *cicloide. (Richard Megna!Funamental Photographs)*

$\vec{v} = 2\vec{v}_{CM}$

$\vec{v}_{CM}$
O

P

s

Para compreender como isso é possível, imagine que você está parado em uma

calçada observando a roda de bicicleta da Fig. 11-3 passar na rua. Como mosra a

.

-

figura, você vê o centro de massa *O* da roda se mover com velocidade constante *VM*·

O ponto *P* em que a roda faz contato com o piso também se move para a frente com [illegible]

vcM

º->

8 O

velocidade *VM,* de modo que *P* permanece sempre diretamente abaixo de *O.*

Durante um intervalo de tempo *t,* você observa os pontos *O* e *P* se deslocarem de uma distâncias. O ciclisa vê a roda irar de um *nlo }* em tono do eixo, com o ponto

P- -

que estava tocando a ua no início do intervalo descrevendo um arco de comprimento

s. A Eq. 10-17 elaciona o comprimento do arco *s* ao ângulo de roação }:

Figua 11-3 O centro de massa *O* de

$s = 8R$,

(11-1) uma roda percorre uma distância *s* com

velocidade *icM* enquanto a roda gira de

em que R é o raio da roda. A velocidade linear *V* do cenro da roda (o centro de um ângulo *O.* O ponto *P* de contato enre *cM*

massa desta roda homogênea) é *ds/dt.* A velocidade angular *w* da roda é *d}/dt.* De a roda e a superfície na qual está rolando rivando a Eq. 11-1 em relação ao tempo (com *R* constante), obtemos

tabém percorre uma distâncias.

$vcM = wR$

(olameno suave).

(11-2)

A Fig. 11-4 mosra que o movimento de rolamento de uma roda é uma combinação de um movimento puro de translação com um movimento puro de rotação. A Fig. 11-4a mostra o movimento puro de rotação (como se o eixo de rotação esivesse estacionário): todos os pontos da roda giram em tono do centro com velocidade angular *w.* Este é o ipo de movimento que discuimos no Capítulo 10.) Todos os

pontos na periferia da roda têm uma velocidade linear escalar *VcM* dada pela Eq. 11-2.

A Fig. ll-4b mostra o movimento puro de ranslação (como se a roda não esivesse rodando): todos os pontos da roda se movem para a direita com uma velocidade escalar VcM·

A combinação dos movimentos representados nas Figs. *11-4a* e l *1-4b* é o rolamento da roda, representado na Fig. 11-4c. Observe que, nesta combinação de movimentos, a velocidade escalar da extremidade

inferior da roda (ponto *P)* é zero e a velocidade escalar da exremidade superior (ponto *T)* é 2vcM, maior que em

qualquer ouro ponto da roda. Esses resultados são confirmados na Fig. 11-5, que

é uma fotograia de longa exposição de uma roda de bicicleta em movimento. O

fato de que os raios da roda estão mais níidos na parte de baixo do que na parte

de cima mostra que a roda está se movendo mais devagar na parte de baixo do que

na parte de cima.

O movimento de qualquer corpo redondo rolando suavemente em uma supeície pode ser separado em movimentos puros de rotação e translação, como nas Figs.

11-4a e l 1-4b.

(*a)* Rotação pura

- -

(*b)* Translação pura

- -

(e) Rolagem

v= vcM

v = vcM

T

T

pura: todos os pontos da roda se movem com a mesma velocidade angular *w.* Todos os Figua 11-5 Fotografia de uma roda

pontos da borda da roda se movem com a mesma velocidade linear escalar *v = VcM·* São de biciclea em movimento. Os raios de

mosradas as velocidades lineares i de dois desses pontos, na borda de cima *(T)* e na borda baixo estão mais nítidos que os raios de baixo (P) da roda. *(b)* Movimento de ranslação pura: todos os pontos da roda se movem de cima porque esão se movendo mais para a direita com a mesma velocidade linear icM· (e) O movimento de rolamento da roda é devagar, como mostra a Fig. 11-4c.

uma combinação de *(a)* com *(b)*.

(Cortesia de Alice Hallidy)

roda: como uma rotação pura em tono de um eixo gue sempre passa pelo ponto de

**\O [illegible]

-

****

1

I

/

contato enre a roda e a superfície sobre a qual a roda está rolando. Consideramos

\ 1

'

o movimento de rolamento como uma rotação pura em tono de um eixo passando

. \ 1 /

' \ I

.

'' \1/ ,,,. .

pelo ponto *P* na Fig. *11-4c* e perpendicular ao plano do papel. Os vetores da Fig .

11-6 mosram as velocidades instantâneas dos pontos da roda.

Eixo de roação e1n *P*

Figua 1 1-6 O rolamento pode ser

Perunta Que velocidade angular em tono deste novo eixo um observador esta

visto como uma rotação pura, com

cionário aribuiria a uma roda de bicicleta?

velocidade anular w, em tono de

Resposta A mesma velocidade angular w que o ciclista atribui à roda quando a

um eixo que sempre passa por *P.* Os

observa em movimento de rotação pura em tono de um eixo passando pelo enro

vetores mosram as velocidades lineares de massa.

instanâneas de pontos escol *h*idos da

roda. Esses vetores podem ser obtidos

Para mostrar que esta resposta está correta, vamos usá-la para calcular a velocidade

combinando os movimentos

linear da exremidade superior da roda, do ponto de visa de um observador estacio

de ranslação e rotação, como na

nário. Chamando de *R* o raio da roda, a exremidade superior está a uma distância *2R*

Fig. 114.

do eixo que passa pelo ponto *P* na Fig. 11-6, de modo que, de acordo com a Eq.11-2, a velocidade linear da exremidade superior é

vsup = *(u)(2R)* = *2(uR)* = 2vcM,

em perfeita concordância com a Fig. 11-4c. O leitor pode verificar que a concordância ambém é observada para os pontos *O* e *P* da Fig. 11-4c.

fTESTE 1

A roda raseira da bicicleta de um pal *h*aço tem um raio duas vezes maior que a roda dianteira. (a) A velocidade linear da exremidade superior da roda raseira é maior, menor ou iual à velocidade linear da extremidade superior da roda dianteira quando a bicicleta está em movimento? (b) A velocidade angular da roda raseira é maior, menor ou iual à velocidade anular da roda dianteira?

1 1 -3 A Energia Cinética de Rolamento

Vamos agora calcular a energia cinética de uma roda em rolamento do ponto de vista de

um observador estacionário. Quando encaramos o rolamento como uma roação pura

em tono de um eixo que passa pelo ponto *P* da Fig. 11-6, a Eq. 10-34 nos dá

(11 -3)

em que w é a velocidade angular da roda e lp é o momento de inércia da roda em

relação a um eixo passando por *P.* De acordo com o teorema dos eixos paralelos da Eq. 10-36 (/ = IcM + Mh2), temos:

(11-4)

onde *M* é a massa da roda, IcM é o momento de inércia da roda em relação a um eixo passando pelo cenro de massa e *R* (o raio da roda) é a distância perpendicular *h.*

Subsituindo a Eq. 11-4 na Eq. 11-3, obtemos

K = !IcMw *2* + !MR *2* w *2*,

e usando a relação VcM = wR Eq. 11-2), temos

(11-5)

Podemos interprear o termo [illegible] *1* CM w2 como a energia cinética associada à roação da roda em torno de um eixo que passa pelo centro de massa (Fig. 11-4a) e o termo

_ Mv,M como a energia cinéica associada ao movimento de ranslação do cenro de

2

massa da roda (Fig. 11-4b). Assim, temos a seguinte regra:

Um objeto em rolamento possui dois tipos de energia cinética: uma energia cinética

de rotação (_/cMw2) associada à rotação em torno do cenro de massa e uma energia

2

cinética de ranslação (..MviM) associada à ranslação do cenro de massa.

2

1 1 -4 As Foças do Rolamento

Atito e Rolamento

Uma roda que rola com velocidade constante, como na Fig. 11-3, não tende a deslizar

no ponto de contato *P* e, portanto, não está sujeita a uma força de arito. Enretanto,

se uma força age sobre a roda para aumentar ou diminuir a velocidade, essa força

produz uma aceleração ãcM do cenro de massa na direção do movimento. A força

também faz com que a roda gire mais depressa ou mais devagar, o que signiica que

ela produz uma aceleração angular a. Essa aceleração tende a fazer a roda deslizar

no ponto *P.* Assim, uma força de arito passa a agir sobre a roda no ponto *P* para se opor a essa tendência.

Se a roda *não desliza,* a força é uma força de arito *esático* , e o movimento é de rolamento suave. Nesse caso, podemos relacionar o módulo da aceleração linear

ãcM à aceleração angular a derivando a Eq. 11-2 em relação ao tempo (com *R* constante). No lado esquerdo, [illegible] é igual a *acM;* no lado direito, *dw/dt* é igual a *a.*

Assim, no caso de um rolamento suave, temos:

**acM = [illegible]

(rolmento suave).

(11-6)

Se a roda *desliza* quando a força é aplicada, a força de arito no ponto *P* da roda da Fig. 11-3 é uma força de atrito *cinético Jk.* Nesse caso, o movimento não é de

rolamento suave e a Eq. 11-6 não se aplica. Neste cpítulo, vamos discutir apenas

movimentos de rolamento suave.

A Fig. 11-7 mostra um exemplo no qual uma roda está sendo acelerada enquanto rola para a direita ao longo de uma superfície plana, como acontece com a roda de uma bicicleta no início de uma corrida. O aumento da velocidade de

e

rotação tende a fazer a parte inferior da roda deslizar para a esquerda no ponto

***P*. Uma força de atrito em *P*, dirigida para a direita, se opõe à tendência de des**

-

lizamento. Se a roda não desliza, a força de arito é uma força de atrito estático

p

s

, (como na Fig. 11-7), o movimento é de rolamento suave e a Eq. 11-6 pode ser

empregada. (Se não fosse o atrito, as corridas de bicicleta seriam estacionárias e Figua 11-7 Uma roda rola muito enfadonhas.)

horizontalmente sem deslizar enquanto

Se a velocidade de rotação da roda na Fig. 11-7 esivesse diminuindo, como acelera com uma aceleração linear âcM·

no caso de uma bicicleta sendo freada, a igura teria que sorer duas modiicações: Uma força de atrito estático , age sobre a roda em *P*, impedindo o deslizamento.

o senido da aceleração do centro de massa ãCM e o sentido da força de atrito , no

ponto *P* passariam a ser para a esquerda.

Rolamento paa Baxo em uma Rampa

A Fig. 11-8 mostra um corpo redondo homogêneo, de massa *M e* raio *R*, rolando suavemente para baixo ao longo de um eixo *x* em uma rampa inclinada de um ângulo O. Queremos obtr uma expressão para a aceleração do corpo ªcM,x ao longo da rampa. Para isso, usamos as versões linear (F, .. = *Ma)* e angular (res = *la)* da segunda lei de Newton.

Para começar, desenhamos as forças que agem sobre o corpo, como mosra a

Fig. 11-8:

1 1 1 1

***F* . -**

1. A força gravitacional g que atua sobre o copo está dirigida para baixo. A origem

desse vetor está no centro de massa do corpo. A componente ao longo da rampa

é *F8* sen *O,* que é igual a *Mg* sen *O.*

2. A força normal FN é perpendicular à rampa e atua no ponto de contato P, mas, na

Fig. 11-8, o vetor foi deslocado ao longo da linha de ação até que a origem icasse

no cenro de massa do corpo.

3. A foça de arito estático , atua no ponto de contato *P* e está dirigida para cima ao longo da rampa. (Você percebe por quê? Caso o corpo deslizasse no ponto *P,*

o movimento seria *para baxo* ao longo da rampa. Assim, a força de arito que se

opõe a esse deslizamento deve esar dirigida *para ci.* ao longo da rampa.)

Podemos escver a segunda lei de Newton para as componentes ao longo do

eixo *x* da Fig. 11-8 (F esx = Max) como

***f,* - Mgsen *8* = MacM,x-**

(11-7)

A Eq. 11-7 tem duas incógnias,. e ªcM.x· ***(Não podemos*** **supor que o valor de . corresponde ao valor máximo, Ís,mx· Tudo que sabemos é que o valor de Ís é suiciente para que o corpo role suavemente para baixo na rampa, sem deslizar.)**

Agora podemos usar a forma angular da segunda lei de Newton para descrever

a rotação do corpo em torno de um eixo horizontal passando pelo cenro de massa.

Para começar, usamos a Eq. 10-41 (T = r.F) para escrever os torques a que o corpo

está submeido. A foça de arito , possui um braço de alavanca R e, portanto, produz um torque ***Rs*** **que é positivo, já que tende a fazer o corpo girar no sentido ani-**

- -

horário da Fig. 11-8. As forças g e FN possuem braço de alavanca nulo em relação

ao cenro de massa e, portanto, produzem torque nulo. Assim, podemos escrever a

forma angular da segunda lei de Newton (Te, = Ia) em relação a um eixo horizontal

passando pelo cenro de massa como

Rf, **= lcMª·**

(11-8)

A Eq. 11-8 tem duas incógnitas,s e a.

Como o corpo está rolando suavemente, podemos usar aEq. 11-6 (acM = aR)

para relacionar as incógnitas acM., e a. Enretanto, devemos ter cuidado, pois neste caso acM.x é negaiva (no senido negaivo do eixo x) e a é posiiva (no senido antihorário). Assim, devemos fazer a = -acM)R na Eq. 11-8. Explicitando/,,

obtemos

f* = -/ *lCM,x

,

(11-9)

.l *R2* .

Subsituindo *s* na Eq. 11-7 pelo lado direito da Eq. 11-9, obtemos:

***g* sen J**

***acM.x* = - 1 + fcMIM[<2 .**

(l l-10)

$$(\frac{1}{2}I_{CM}\omega^2 + \frac{1}{2}Mv_{CM}^2) + 0 = 0 + Mgh,$$

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

291

Podemos usar a Eq. 11-1 O para determinar a aceleração linear *aM.x* de qualquer coro

que rola suavemente em um plano inclinado cujo ângulo com a horizontal é O.

TESTE 2

Os discos *A* e *B* são iguais e rolam inicialmente em um piso horizonal com a mesma v e locidade. O disco *A* sobe uma rampa com arito e atinge uma alura máxima *h;* o disco *B*

sobe uma rampa iual à primeira, mas sem arito. A altura máxima atingida pelo disco *B*

é maior, menor ou iual a *h?*

Exemplo

Bola que desce uma rampa

Uma bola homogênea, de massa M = 6,00 kg e raio R, incógnitas da Eq. 11-12. Fazendo isso, substituindo IcM

rola suavemente, a parir do repouso, descendo uma rampa

inclinada de ângulo }

por ! *MR2* (de acordo com a Tabela 10-2) e explicitando

= 30,0° (Fig. 11-8).

v

(a) A bola desce uma distância vertical h

M, obtemos

= 1,20 m para

chegar à base da rampa. Qual é a velocidade da bola ao

vcM = [illegible] = [illegible] m/s2)(1,20 m)

chegar à base da rampa?

= 4.10 m/s.

(Resposta)

IDEIAS-CHAVE

Note que a resposta não depende de *M* nem de *R*.

A energia mecânica E do sistema bola-Terra é conservada (b) Quais são o módulo e a orientação da força de arito quando a bola rola rampa abaixo. Isso acontece porque a que age sobre a bola quando desce a rampa rolando?

única força que realiza rabalho sobre a bola é a força gravitacional, que é uma força conservaiva. A força normal IDEIA-CHAVE

exercida pela rampa sobre a bola não realiza rablho por Como a bola rola suavemente, a força de arito que age que é perpendicular à rajetória da bola. A força de atrito sobre a bola é dada pela Eq. 11-9.

exercida pela rampa sobre a bola não ransforma energia

em energia térmica porque a bola não desliza (a bola *rola álulos* Para usar a Eq. 11-9, precisamos conhecer a *suavemente).*

aceleração da bola, *acM.x*• que pode ser calculada com o

(onde *M* é a massa da bola). Na siuação inal, *U1* = O. A Note que não precisamos conhecer nem a massa *M* nem o energia cinética é, inicialmente, K; = O. Para calcular a raio *R* da bola para calcular *acM.x-* Isso significa que uma energia cinética final *K*

bola de qualquer tamanho e qualquer massa (contanto que

1 precisamos de uma ideia adicional: como a bola rola, a energia cinéica envolve translação seja homogênea) tem a mesma aceleração para baixo em *e* rotação, de modo que devemos incluir as duas formas de uma rampa com uma inclinação de 30,0°, desde que role energia cinética usando o lado direito da Eq. 11-5.

suavemente.

Podemos agora resolver a Eq. 11-9 para obter o valor

***álulos* Substituindo todas essas expressões na Eq. do módulo da força de arito: 11-11, obtemos**

***f* , = _ 1 acM.x**

CM

**= [illegible]

**2 [illegible]

MR

= -.1/a

(11-12)

R2

5

R2

5

CMt

em que *IcM* é o momento de inércia da bola em elação a um

= -}(6,00 kg)(- *3,50* m/s2) = 8.40 N.

(Resposta)

eixo que passa pelo cno e massa, vCM é a velocidade pdida Note que precisamos da massa *M,* mas não do raio *R.* Isso na base da rampa e w é a velocidade angular na base da rampa. signiica que a força de arito excida sobre qualquer bola Como a bola rola suavemente, podemos usar a Eq. de 6,00 kg que rolar suavemente em uma rampa de 30,0°

11-2 para substituir w por VcMIR e reduzir o número de será 8,40 N, independentemente do raio da bola.

R_0

$a_{CM} = -$

$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$

1 1 -5 O Ioiô

O ioiô é um laboratório de ísica que cabe no bolso. Se um ioiô desce rolando uma

disância *h* ao longo da corda, perde uma quantidade de enegia potencial igual a mgh, mas ganha energia cinética tanto na forma de ranslação (iMvlM) como de

rotação e! *IcMw2).* Quando volta a subir, perde energia cinética e readquire energia

potencial.

Nos ioiôs modenos, a corda não está presa no eixo, mas forma uma laçada em

torno do eixo. Quando o ioiô "bate" na extremidade inferior da corda, uma força di

-

rigida para cima, exercida pela corda sobre o eixo, interrompe a descida. O ioiô passa

T

a girar, com o eixo enlaçado pela corda, apenas com energia cinéica rotacional. O

ioiô se mantém girando ("adormecido") até ser "despertado" por um puxão na corda, que faz a corda se enrolar no eixo e, consequentemente, o ioiô voltar a subir. A energia cinéica rotacional do ioiô na exremidade inferior da corda (e, portanto, o

-

tempo de "sono") pode ser consideravelmente aumentada arremessando o ioiô para

baixo para que comece a descer a corda com velocidade inicial linear *VcM* e veloci

F

dade angular *w* em vez de rolar para baixo a partir do repouso.

g

(a)

(b)

Para obter uma expressão para a acelração linear *ªcM* de um ioiô que rola para

baixo em uma corda, podemos usar a segunda lei de Newton, como izemos para

Figura 11-9 (a) Um ioiô visto de

lado. A coroa, considerada de espessura o corpo que rolava para baixo na rampa da Fig. 11-8. A análise é a mesma, exceto despreível, esá enrolada em um eixo

pelo seguinte:

de raio *R0*• (b) Diarama de corpo livre

1. Em vez de descer rolando por uma rampa que faz um ângulo } com a horizontal,

do ioiô durante a descida. Apenas o eixo

o ioiô desce por uma corda que faz um ângulo } = 90º com a horizontal.

é mostrado.

2. Em vez de rolar sobre a superfície extena de raio R, o ioiô rola em tomo de um

eixo de raio *R0* (Fig. l 1-9a).

3. Em vez de ser reado pela força de arito ,, o ioiô é freado pela força f que a

corda exerce sobre ele (Fig. l *1-9b*).

A análise do movimento novamente nos levaria à Eq. 11-10. Assim, vamos apenas mudar a notação da Eq. 11-1 O e fazer} = 90º para escrever a aceleração linear como

g

(11-l3)

2 .

1 + *lcMIMRo* ·

em que *IcM* é o momento de inércia do ioiô em relação a um eixo passando pelo

cenro e *M* é a massa Um ioiô possui a mesma aceleração para baixo quando está

subindo de volta.

1 1 -6 Revisão do Torque

No Capíulo 10, deinimos o torque *T* de um corpo rígido capaz de girar em tomo de um eixo fixo, com todas as parículas do corpo sendo forçadas a se mover em rajetórias circulares com cenro nesse eixo. Agora, vamos ampliar a definição de torque para aplicá-la a uma partícula que se move em uma rajetória qualquer em relação a

um *ponto* ixo (em vez de um eixo fixo). A rajetória não precisa mais ser circular e

devemos escrever o torque como um vetor *r* que pode ter qualquer orientação.

A Fig. *11-lOa* mosra uma parícula no ponto *A* de um planoy. Uma única for

ça *F* nesse plano age sobre a partícula e a posição da partícula em relação à origem

***O* é dada pelo vetor posição *r.* O torque *r* que age sobre a partícula em relação ao ponto xo *O* é uma randeza vetorial deinida por**

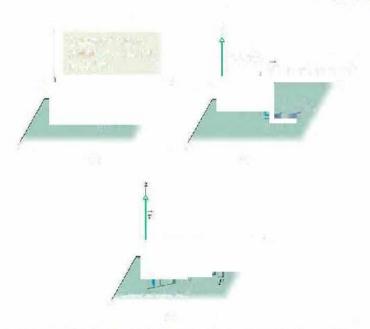
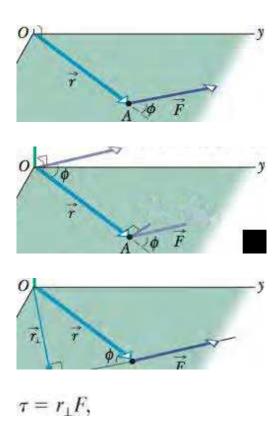
(definiçã, de torque).

(11-14)

Podemos calcular o produto vetorial envolvido na deinição de f usando as regras

do produto vetorial que aparecem na Seção 3-8. Para determinar a orientação de f,

deslocamos o vetor *F* (sem mudar a orientação) até que a origem do vetor esteja no

$$\tau = r_\perp F,$$

z

z

O torque r tem o

-

sentido do semieixo

í (- -

***z* positivo.**

=rXF) *F* (com a origem em O)

F

X

X

(a)

(b)

-*A*

Linha de ação de *F*

X

(e)

Figura 11-10 Deinição do torque. (a) Uma força F, no plano *y,* age sobre uma parícula siuada no ponto *A.* (b) Essa força produz um torque *i(* = *r* X ') sobre a partícula em relação à origem *O.* De acordo com a rea da mão direia para o produto vetorial, o vetor torque aponta no senido positivo do eixo z. O módulo é dado por rF. em (b) e por r.F em (e).

ponto *O,* o que faz coincidirem as origens dos dois vetores envolvidos no produto vetorial, como na Fig. 11-lOb. Em seguida, usamos a regra da mão direita para produtos vetoriais da Fig. 3-19a, envolvendo com os dedos da mão direita o vetor *r* (o primeiro vetor no produto) com as pontas dos dedos apontando para *F* (o segundo

vetor). O polegar direito esicado mosra a orientação de f. Na Fig. 11-lOb, a orientação de f é o sentido positivo do eixo *z.*

Para determinar o módulo de f, aplicamos a expressão geral da Eq. 3-27 (e =

ab sen ,), o que nos dá

r = rf' sen *p,*

{11-15)

em que , é o menor dos ângulos enre r e *F* quando as oigens dos vetores coincidem.

De acordo com a Fig. 11-lOb, a Eq. 11-15 pode ser escrita na forma

r = rF.,

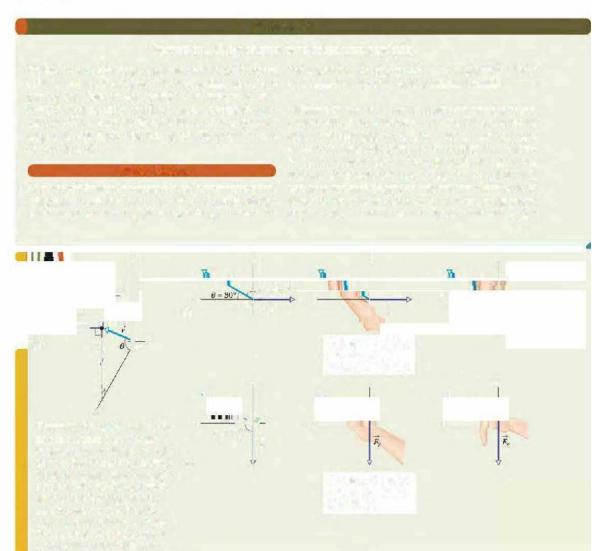
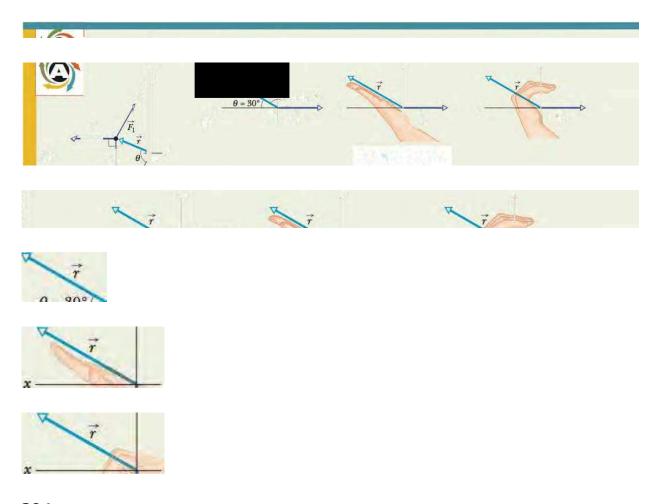
(1 1-16)

em que F. (= F sen ,) é a componente de *F* perpendicular *a r.* De acordo com a Fig. 11-lOc, a Eq. 11-15 também pode ser escrita na forma

(11-17)

em que r. (= r sen ,) é o braço de alavanca de *F* (a distância perpendicular enre o ponto *O* e a linha de ação de *F).*

TESTE 3

O vetor posição r de uma partícula apona no sentido positivo de um eixo *z.* Se o torque a que a partícula está submetida (a) é zero, (b) aponta no sentido negativo de *x* e (c) apona no sentido negativo de *y,* qual é a orientação da força responsável pelo torque?

294

CAPÍTULO 1 1

Exemplo

Torque exercido por uma for ça sobre uma partícula

Na Fig. 11-l la, rês forças, todas de módulo 2,0 N, agem dados pela Eq. 11-15 (-r = *rF* sen >) e orientações dadas sobre uma partícula. A parícula está no plano *y,* em um pela regra da mão direita para produtos vetoriais.

ponto *A* dado por um vetor posição r tal que *r* = 3,0 m e

-

-

} = 30°. A força ; é paralela ao eixo *x*, a força *F2* é pa- *Cálos* Como estamos interessados em calcular os torralela ao eixo *z* e a força i é paralela ao eixo *y*. Qual é o ques em relação à origem *O*, o vetor *r* usado para clcular torque, em relação à origem *O*, produzido por cada uma os produtos vetoriais é o próprio vetor posição que apadas rês forças?

rece no enunciado do problema. Para determinar o ângulo > enre a orientação de r e a orientação de cada força, IDEIA-C HAVE

deslocamos os vetores força da Fig. 11-1 la, um de cada

Como os rês vetores das forças não estão no mesmo plano, vez, para que suas origens coincidam com o ponto *O*. As não podemos clcular os torques como no Capítulo 10. Em Figs. 11-l lb, 11-l lc e 11.l ld, que são vistas superiores vez disso, devemos usar produtos vetoriais, com módulos do plano *xz*, mostram os vetores força deslocados i, *i e*

z

z

z

z

/t

I

r, = 150º

I

-

-

-

X

o

X

-

X

F,

(b)

_*i*

i

[illegible] *A*

-

(a)

F

O torque *i* aponta

2

o y

para dento do

papel (y negativo).

z

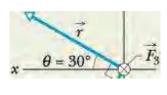
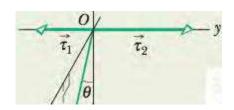
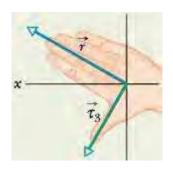
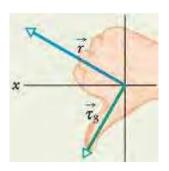
apona para denro do papel). (e)

Os torques (em relação à origem

O) que agem sobre a partícula.

1 1 -7 Momento Angular

Como vimos em capítulos anteriores, o conceito de momento linear *p* e a lei de conservação do momento linear são ferramentas exremamente poderosas, que permitem prever, por exemplo, o resulado de uma colisão de dois carros sem cohecer os dethes da colisão. V amos iniciar agora a discussão de uma grandeza correspondente a *p* para movimentos de rotação, terminando na Seção 11-11 com uma lei, para movimentos de rotação, análoga à lei de conservação do momento linear.

A Fig. 11-12 mosra uma partícula de massa *m* e momento linear p (= *mv)* que está passando pelo ponto *A* de um plano *y.* O momento angular , da parícula em relação à origem *O* é uma grandeza vetorial deinida através da equação

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

F3, respecivamente. (Observe como isso torna muito mais e

-r3 = *rF3* sen </>*3* = (3.0 m)(2,0 N)(sen 90º)

fácil visualzar os ângulos.) Na Fig. 11-1 ld, o ângulo en-

= 6,0 N · m.

(Resposta)

tre as orientações de *r* e F; é 90° e o símbolo ® significa

que o senido de F

Para determinar a orientação desses torques, usamos a

3 é para dentro do papel. Se o senido

da força fosse para fora do papel, ela seria representada regra da mão direita, posicionando os dedos da mão direita pelo símbolo 0.

em volta de r de modo a que apontem para *F* na direção do

Aplicando a Eq. 11-15 a cada força, obtemos os mó *menor* dos ângulos entre os dois vetores. O polegar apondulos dos torques: ta na direção do torque. Assim, 1\ aponta para denro do

papel na Fig. 11-1 lb; *f* 2 aponta para fora do papel na Fig.

71 = *rF* 1 sen > 1 = (3,0 m)(2,0 N)(sen 150º) = 3,0 N · m.

11-1 lc; f3 tem a orientação mostrada na Fig. 11-1 *ld.* Os

72 = rr2 sen 2 = (3,0 m)(2,0 N)(sen 120º) = 5,2 N · m,

rês vetores torque são mosrados na Fig. 11-11 *e.*

z

partícula *não precisa* estar girando em torno de *O*. Comparando as Eqs. 11-14

e 11-18, vemos que a relação entre o momento angular e o momento linear é a

mesma que entre o torque e a força. A unidade de momento angular do SI é o

quilograma-metro quadrado por segundo (kg · m2/s), que equivale ao joule-segundo (J · s).

z

Para determinar a orientação do vetor momento angular ê na Fig. 11-12, desf(= *rX* f) locamos o vetor *p* até que a origem coincida com o ponto *O.* Em seguida, usamos a

-

.

p (com a ongem

regra da mão direita para produtos vetoriais envolvendo o vetor *r* com os dedos da

e,n O)

mão direita apontados para o vetor *p.* O dedo polegar esicado mosra que - aponta

no senido positivo do eixo *z* da Fig. 11-12. O sentido posiivo corresponde a uma

rotação do vetor posição *r* no senido [illegible] em tono do eixo *z,* associada ao movimento da parícula. (O senido negaivo de e

correspponderia a uma roação de

***r* em tono do eixo *z* no senido horário.)**

X

Para determinar o módulo de ,, usamos a Eq. 3-27 para escrever

(a)

e = rnt V sen >,

(1 1-19)

z

-

onde p é o menor ângulo enre *r* e *p* quando os dois vetores têm uma origem comum.

De acordo com a Fig. 1 l-12a, a Eq. 11-19 pode ser escrita na forma

r

***e* = rp1 = rn1v.,**

(1 1-20)

onde *p* 1. é a componente de p perpendicular a *r* e v 1 é a componente de *v* perpendi

-

cular a *r.* De acordo com a Fig. 11-l *2b,* a Eq. 11-19 pode ser escrita na forma *r,*

-

[illegible] p**

e = r.p = r.mv,

(11-2 1)

Prolongamento *de p*

onde r. é a distância perpendicular enre *O* e a extensão de *p*.

X

(b)

Note o seguinte: (1) o momento angular tem significado apenas em relação a um

Figura 11-12 Definição de momento

ponto dado; (2) o vetor momento angular é sempre perpendicular ao plano formado

angular. Uma partícula ao passar

pelos vetores posição e momento linear, *r* e p.

pelo ponto *A* possui momento linear

***p* (= *mi)*, com o vetor *p* no plano *y.* A partícula possui momento angular**

"TESTE 4

***(* (= r X p) em relação à origem *O.* Pela**

regra da mão direita, o vetor momento

Na parte *a* da igura, as partí

3 > •

2

. ,

-----.

I

movem na mesma dir

'

/

ção, em

.

/

. —

linha reta, a 4 m e 2 m de dis

(a)

(b)

tância perpendicular do ponto

_O_, respectivamente. A partícula 5 se afasta de _O_ ao longo de uma linha reta que passa por _O_. As cinco partículas têm a mesma massa e a mesma velocidade constante. (a) Ordene as partículas de acordo com o módulo do momento angular em relação a _O_, em ordem decrescente. (b) Quais das partículas possuem momento angular negativo em

relação a _O?_

-

Exemplo

Momento angular de um sistema de duas partículas

A Fig. 11-13 mosra uma visa superior de duas parículas

IDEIA-CHAVE

que se movem com velocidade consante ao longo de rajetó

-

rias horizontais. A parícula 1, com um momento de módulo Para determinar *L*, basta calcular os momentos angulares *p*, = 5,0 kg · m/s, tem um vetor posição ; e passará a 2,0 das duas partículas, *1*, e *12*, e somá-los. Para calcular os m de distância do ponto *O*· A partícula 2, com um momen módulos dos momentos angulares, podemos usar qualquer to de módulo *p*

das Eqs. 11-18 a 11-21. Entretanto, a Eq. 11-21 é a mais

***2* = 2,0 kg · m/s, tem um vetor posição z e**

passará a 4,0 m de distância do ponto *O*. Qual é o módulo fácil neste caso, já que conhecemos as distâncias perpene a orientação do momento angular total *i* em relação ao diculares r *1*. (= 2,0 m) e ru (= 4,0 m) e os módulos dos ponto *O* do sistema formado pelas duas parículas?

momentos lineares, *p*, e *p2*•

áluls **No caso da parícula 1, a Eq. 11-21 nos dá**

e *1* = r. *1* P *1* = (2.0 m)(5,0 kg· m/s)

= 10 kg· m2/s.

Para determinar a orienação do vetor *ei*, usamos a Eq. 11-18

e a regra da mão direita para produtos vetoriais. No caso de

i **X *Pi*, o produto vetorial aponta para fora do papel, per Figura 11-13 Duas partículas passam nas proximidades do pendicularmente ao plano da Fig. 11-13. Este é o senido ponto *O*.**

posiivo, já que o vetor posição *i* da partícula gira no senido

anti-horáio em relação a *O* quando a partícula 1 se move. Assm, o vetor momento angular da parícula 2 é Assim, o vetor momento angular da partícula 1 é

e

e

2 = -8,0 kg· m2/s.

l = + 10 kg· m2/s.

Analogamente, o módulo de 12 é

O momento angular total do sistema formado pelas duas

partículas é

***e2 = r12P2* = (4,0 m)(2,0 kg·m/s)**

***L = (* 1 + *C2* = + 1 O kg· 1n2/s + (-8.0 kg· m2/s)**

= 8,0 kg· m2/s,

= + 2,0 kg· m2/s.

(Resposta)

e o produto vetorial z X p2aponta para dentro do papel, que

é o sentido negaivo, já que o vetor posição z gira no sen O sinal posiivo indica que o momento angular resulante do tido horário em relação a *O* quando a partícula 2 se move. sistema em relação ao ponto *O* apona para fora do ppel.

1 1 -8 Segunda Lei de Newton para Rotaões

A segunda lei de Newton escria na forma

p = *df*

s

(partícula isolada)

(11-22)

dt

expressa a relação enre força e momento linear para uma partícula isolada. Temos

visto um suiciente paralelismo entre grandezas lineares e angulares para estar seguros de que existe ambém uma relação entre torque e momento angular. Guiados pela Eq. 11-22, podemos até mesmo conjeturar que essa relação seja a seguinte:

-

dê

7

=

s

dt

artícula isolada).

(11-23)

A Eq. 11-23 é, de fato, uma forma da segunda lei de Newton que se aplica ao movimento de rotação de uma partícula isolada: A soma (vetorial) dos torques que agem sobre uma partícula é igual à taxa de variação

no tempo do momento angular da partícula.

A Eq. 11-23 não faz senido a menos que o torque i,es e o momento angular *l* sejam

definidos em relação ao mesmo ponto, que, em geral, é a origem do sistema de coordenadas escolhido.

Demonstaão da Equação 1 1 -23

Começamos com a Eq. 11-18, a deinição do momento angular de uma partícula:

- *e* = *nz(r* X *v),*

em que *r* é o vetor posição da parícula e *v* é a velocidade da parícula. Derivando*

*** Ao derivar um produto vetorial, é importante manter a ordem das grandezas (r e i, no caso) que fonnam o produto. (Veja a q. 3-28.)**

ambos os membros em relação ao tempo *t,* obtemos:

***1 e _* (- *dv dr* -)**

dt - m r

(1 1-24)

X *dt* + *dt* X *V* •

Entreanto, *dv* / *dt* é a aceleração *ã* da parícula e ãr / *dt* é a velocidade *v.* Assim, podemos escrever a Eq. 11-24 na forma

d e

**e- **

- - = *ni r* X *a* + *V* X *V)·*

dt

Acontece que *v* X *v* = O (o produto vetorial de qualquer vetor por si próprio é zero, pois o ângulo enre os dois vetores é necessariamente zero). Assim, temos:

dê

(+ -) -

>

dt* = *m r* x *a* = *r* x *,na.

Podemos usar a segunda lei de [illegible] .. = mã) para substituir mã pela soma das

forças que atuam sobre a partícula, obtendo

dê = - ***r*** **x -** ***F*** **es = [illegible]

, - ***r*** **X -)**

de

!· **.**

(l l -25)

Em que o símbolo: indica que devemos somar os produtos vetoiais ***r*** **X** ***F*** **para todas as forças. Enretanto, de acordo com a Eq. 11-14, cada um desses produtos vetoriais**

é o torque associado à força correspondente. Assim, a Eq .11-25 nos diz que

r,.s = dt **.**

Esta é a Equação 11-23, a relação que queríamos demonstrar.

TESTE 5

A i

-

ra mostra o vetor posição r de uma parícula

y

em um certo insante e quatro opções para a orien- ***F2***

tação de uma força que deve acelerar a partícula. As

-

quatro opções estão no plano ***y.*** **(a) Ordene as opções _**

-. *r*

de acordo com o módulo da taxa de variação com o Fi

F1 -

[illegible] -**

-*x*

o

tempo *(dê/ dt)* que produzem no momento angular

da partícula em relação ao ponto *O*, em ordem decres-

cente. (b) Qual das opções está associada a uma taxa de variação negativa do momento

angular em relação ao ponto *O?*

Exemplo

Torque, derivada do momento angular e a queda de um pinguim

Na Fig. 11-14, um pinguim de massa *m* cai, sem velocidade p é o momento linear do pinguim. (O pinguim possui um inicial, do ponto *A*, situado a uma distância horizontal *D* momento *angular* em relação a *O*, embora estja se moda origem *O* de um sistema de coordenadas *yz.* (O sentido vendo em linha reta, porque o vetor *r* gira em tomo de *O*

posiivo do eixo z é para fora do papel.)

durante a queda)

(a) Qual é o momento angular *l* do pinguim durante a queda, em relação ao ponto *O?*

***Cálculos* Para determinar o módulo de *f*, podemos usar**

qualquer uma das equações escalares obidas a parir da

IDEIA-CHAVE

Eq. 11-18, ou seja, as Eqs. 11-19 a 11-21. Enretanto, a Eq.

Tratando o pinguim como uma parícula, seu momento 11-21 *(e* = r.mv) é a mais fácil de usar porque a distância angular e é dado pela Eq. 11-18 (l = *r* X *p),* onde *r é* o perpendicular r. enre *O* e o prolongamento do vetor *p é*

vetor posição do pinguim (que vai de *O* até o pinguim) e um dos dados do problema (a distância *D).* A velocidade

de um objeto que cai a partir do repouso durante um inter

y

valo de tempo *t* é *v* = *gt.* Podemos escrever a Eq. 11-21

0

em termos dos valores conhecidos na forma

,- -

D

- -·IA

-

-

-+. X

--

***e* =**

!, e

r1m.v = D,ngt.

(Resposta)

Para determinar a orientação de *ê*, usamos a regra da

mão direita para o produto vetorial r X *p* da Eq. 11-18.

Deslocamos mentalmente o vetor p até que a origem do

vetor esteja no ponto *O* e envolvemos r com os dedos da

mão direita apontando na direção de *p.* O dedo polegar

estendido aponta para dentro do papel, mostrando que

o produto *r* X *p* e, portanto, *e* tem essa orientação, que

coincide com o sentido negativo do eixo *z.* Representamos f pelo símbolo ® no ponto *O.* Apenas o módulo do vetor *f* varia com o tempo; a orientação permanece

inalterada.

(b) Qual é o torque f em relação ao ponto *O* a que é

submeido o pinguim devido à força gravitacional?

Figura 11-14 Um pinuim cai verticalmente de um ponto

IDEIAS-CHAVE

***A.* O torque *T* e o momento angular *f* do pinuim em relação à origem *O* aponam para denro do plano do papel e passam**

(1) O torque é dado pela Eq. 11-14 (f = r X F), onde agora pelo ponto *O.*

a força é *g.* (2) A força *g* produz um torque sobre o pinguim, embora o animal esteja se movendo em linha reta, porque r gira em tono de *O* durante a queda.

Os resultados que obivemos nos itens (a) e (b) devem

ser coerentes com a segunda lei de Newton para rotações,

***álculos* Para determinar o módulo de f, podemos usar Eq. 11-23 (r, •• = *df / dt).* Para verificar se os módulos calqualquer uma das equações escalares obidas a partir da culados estão corretos, escrevemos a Eq. 11-23 na forma Eq. 11-14, ou seja, as Eqs. 11-15 a 11-17. Enretanto, a de componentes em relação ao eixo z e usamos o resultado Eq. 11-17 (r = r.F) é a mais fácil de usar porque a dis . = *Dmgt.* Temos:**

tância perpendicular *r* . entre *O* e a linha de ação de *g* é

um dos dados do problema (a distância *D).* Subsituindo

dt

d(Dmgt)

***T* =**

=

= *Dmg.*

r

dt

dt

. por *D* e o módulo de *g* por *mg,* podemos escrever a Eq.

11-17 na forma

que é o módulo que encontramos para f. Para veriicar se

T = DFx = D,ng.

(Resposta) as orientações estão coretas, observamos que, de acordo

- com a Eq. 11-23, *fede/ dt* devem ter a mesma orientação.

Usando a egra da mão dieita para o produto vetorial *r* X *F* Assim, T e *e* também dvem ter a mesma orientação, o que daEq. 11-14, descobrimos que a orientação de f é o sen corresponde exatamente ao resultado obtido.

tido negaivo do eixo *Z,* a mesma de *f.*

1 1 -9 O Momento Angular de um Sistema de Patículas

Voltamos agora nossa atenção para o momento angular de um sistema de paríículas

em relação a uma origem. O momento angular total *L* do sistema é a soma (vetorial)

dos momentos angulares l das paríículas do sistema: "

r = t1 + t2 + *êJ* + · · · + 7n = L 7;.

(11-26)

'= 1

Os momentos angulares das paríículas podem variar com o tempo por causa de

forças externas ou de interações entre as partículas. Podemos determinar a variação

total de *L* derivando a Eq. 11-26 em relação ao tempo:

-

-

***dL* = i *de;* .**

dt

i= 1 dt

(11-27)

$$\ell_i = (r_i)(p_i)(\text{sen } 90°) = (r_i)(\Delta m_i\, v_i),$$

De acordo com aEq. 11-23, *df/dt* é igual ao toqueresultante *r* es a que está submetida a partícula de ordem *i.* Assim, a Eq. 11-27 pode ser escrita na forma

dL

"

(1 1 -28)

***dr* = _: .es/**

1= 1

Isso significa que a axa de variação do momento angular *i* do sistema é igual à soma

vetorial dos torques a que estão submetidas as partículas do sistema. Esses torques

podem ser torques *internos* (produzidos por forças associadas a ouras partículas do

sistema) e torques *externos* (produzidos por forças associadas a corpos extenos ao

sistema). Como as forças exercidas pelas partículas do sistema sempre aparecem na

forma de pares de forças da terceira lei, a soma dos torques produzidos por essas

forças é nula. Assim, os únicos torques que podem fazer variar o momento angular

total *L* do sistema são os torques produzidos por forças extenas ao sistema.

Chamando de *r* s o torque exteno resulante, ou seja, a soma vetorial dos torques extenos que agem sobre todas as parículas do sistema, a Eq. 11-28 pode ser escria na forma

-

z

.

dL

T

(11-29)

tS =

d{

(sis1;ma dé pa11ícula).

que é a segunda lei de Newton para rotações. Em palavras:

O torque exteno resultante *r _*, que age sobre um sistema de partículas é igual à taxa de variação com o tempo do momento angular total *i* do sistema.

***r*•**

A Eq. 11-29 é análoga à Eq. 9-27 ('s = *dP / dt),* mas requer um cuidado adicional: os torques e o momento angular do sistema devem ser medidos em relação

-t-

0

-

-*y*

à mesma origem. Se o centro de massa do sistema não está acelerado em relação

X

a um referencial inercial, essa origem pode ser qualquer ponto. Caso, porém, o

(a)

cenro de massa do sistema esteja acelerado, a origem deve ser o cenro de massa.

Considere, por exemplo, uma roda como o sistema de partículas. Se a roda está

girando em torno de um eixo ixo em relação ao solo, a origem usada para aplicar

a Eq. 11-29 pode ser qualquer ponto estacionário em relação ao solo. Entretanto, se a roda estiver girando em torno de um eixo acelerado (como acontece, por exemplo, quando a roda está descendo uma rampa), a origem deve ser o centro de

massa da roda.

1 1 -1 O Momento Angular de um Corpo Rígido Girando

X

(b)

em Torno de um Eixo Fixo

Figua 11-15 (a) Um corpo rígido gira V amos agora calcular o momento angular de um corpo rígido que ira em tono de um em torno de um eixo z com velocidade

eixo ixo. A Fig. l 1-15a mostra um corpo desse ipo. O eixo fixo de roação é o eixo

angular *w.* Um elemento de massa *.m;*

z

situado no interior do corpo se move

e o corpo gira em tono do eixo com uma velocidade angular constante *w.* Estamos

em tomo do eixo *z* em um crculo de

interessados em calcular o momento angular do corpo em relação a esse eixo.

raio *r*

Podemos calcular o momento angular somando as componentes z dos momentos

.j· O elemento de massa possui

momento linear *p;* e sua posição em

angulares de todos os elementos de massa do corpo. Na Fig. 11-1 *Sa,* um elemento

relação à origem *O* é determinada pelo

de massa típico, de massa *lm;,* está se movendo em tono do eixo *z* em uma raje

vetor posição ;. O elemento de massa

tória circular. A posição do elemento de massa em relação à origem *O* é dada pelo

é mostrado na igura no instante em

vetor posição ;. O raio da rajetória circular do elemento de massa é *r* 1;, a distância que *r* .i está paralelo ao eixo *x.* (b) O

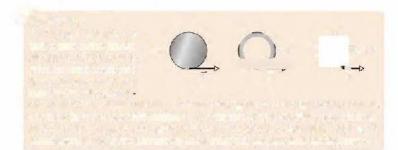
perpendicular entre o elemento e o eixo *z.*

momento angular *P;* do elemento de

O módulo do momento angular *ê;* desse elemento de massa em relação a *O* é massa do item (a) em relação a *O.*

dado pela Eq. 11-19:

A componente *z, (;,,* também é mostrada

na figura.

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

301

onde P; e *V;* são o momento linear e a velocidade linear do elemento de massa e 90°

é o ângulo entre ; e *P;*. O vetor momento angular *êi* do elemento de massa da Fig.

11-lSa aparece na Fig. 11-lSb; o vetor é perpendicular a i e J;.

Estamos interessados na componente de li na direção paralela ao eixo de rota

ção, em nosso caso o eixo *z*. Essa componente é dada por

***e. ll* = e-sen8 =**

I

(r-l sen8\() im·I V·) =

I

r, L , I i m·I V· r•

A componente *z* do momento angular do corpo rígido com um todo pode ser calculada somando as conribuições de todos os elementos de massa do corpo. Como v = wr., podemos escrever

,,

,,

li

L: = : *eiz* = : .*n,i* V/i; = : .11;(Wli;)r.;

l = I

i = I

i=I

= *w* ([illegible] .,*ni r_;)*.

(1 1 -30)

, _ 1

Podemos colocar w do lado de fora do somatório porque tem o mesmo valor em todos os pontos do corpo rígido.

O fator .:wi;r}; na Eq. 11-30 é o momento de inércia Ido corpo em relação ao

eixo xo (veja a Eq. 10-33). Assim, a Eq. 11-30 se reduz a

***L* = *lw* (corpo rigido. eixo fixo).**

(11-31)

O índice *z* foi omiido na Eq. 11-31, mas o leitor deve ter em mente que o momento

angular que aparece na equação é o momento angular em tomo do eixo de rotação

e que I é o momento de inércia em relação ao mesmo eixo.

A Tabela 11-1, que complementa a Tabela 10-3, amplia nossa lista de correspondências enre movimentos de translação e rotação.

"TESTE 6

Na fiura, um disco, um

anel e uma esfera maciça Disco

º Anel

Esfera

são postos para girar como

piões em tono de um eixo

-

-

central ixo por meio de um

F

F

F

barbante enrolado, que apli-

ca a mesma força tangencial constane P aos rês objetos . Os tês objetos têm a mesma

massa e o mesmo raio e estão inicialmente em repouso. Ordene os objetos de acodo (a)

com o momento anular em relação ao eixo cenral e (b) com a velocidade angular, em

ordem decrescente, após o barbante er sido puxado por um certo intervalo de tempo *t.*

***T* s =**

- *dt*

Lei de conservaçãod

***P* = constante Lei de conservaçãod**

/, - constante

•Veja também a Tabela 10-3.

"Para sistemas de parículas, incluindo corpos rígidos.

'Para um corpo rígido girando em tono de um eixo fixo; *L* é a componente paralela ao eixo.

•Para um sistema fechado e isolado.

ω_i

I_i

ω_f

I_f

1 1 -1 1 Consevação do Momento Angular

Até o momento, discuimos apenas duas leis de conservação, a lei de conservação

da energia e a lei de conservação do momento linear. Vamos agora falar de uma

terceira lei desse ipo, que envolve a conservação do momento angular. O ponto

de partida é a Eq. 11-29 (f s = *dL* / *dt)*, que é a segunda lei de Newton para rota

ções. Se nenhum torque exteno resultante age sobre o sistema, a equação se toma

***dL I dt* = O, ou seja,**

L = constante

(sistema isolado).

(11-32)

Este resultado, conhecido como lei de conservação do momento anular, também

pode ser escrito na forma

(momento angular total) _ (momento angular total)

en, um instante inicial *l* í - e1n uni instante posterior t *1* '

- , -

ou

L; = Ll (sistcn1a isolad>).

(1 1-33)

-

As Eqs. 11-32 e 11-33 significam o seguinte:

L

Se o torque externo resulante que age sobre um sistema é nulo, o momento angular *L*

do sistema permanece constante, sejam quais forem as mudanças que ocorem dentro do

sistema.

As Eqs. 11-32 e 11-33 são equações vetoriais; como tais, são equivalentes a

rês equações para as componentes, que correspondem à conservação do momento

angular em três direções mutuamente perpendiculares. Dependendo dos torques extenos que agem sobre um sistema, o momento angular pode ser conservado apenas em uma ou duas direções:

Se a componente do torque *xterno* resultante que age sobre um sistema ao longo de Eixo de rotação

um eixo é nula, a componente do momento angular do sistema ao longo desse eixo

(a)

permanece constante, sejam quais forem as mudanças que ocorrem denro do sistema.

L

Podemos aplicar esta lei ao corpo isolado da Fig. 11-15, que está girando em

tomo do eixo z. Suponha que em um certo instante a massa do corpo é redisribuída de tal forma que o momento de inércia em relação ao eixo z muda de valor. De acordo com as Eqs. 11-32 e 11-33, o momento angular do corpo não pode mudar.

Subsituindo a Eq. 11-31 (para o momento angular ao longo do eixo de rotação) na

Eq. 11-3 3, esta lei de conservação se torna

l;w; = fr)J·

(11 -34)

onde os índices se referem aos valores do momento de inércia I e da velocidade w

antes e depois da redistribuição de massa.

Como acontece com as duas ouras leis de conservação discutidas anteriormente,

as aplicações das Eqs. 11-32 e 11-33 vão além dos limites da mecânica newtoniana.

(b)

As mesmas equações são válidas para parículas que se movem com uma velocidade

Figua 11-16 (a) O estudante possui

próxima da velocidade da luz (caso em que deve ser usada a teoria da relatividade

um momento de inércia relativamente

especial) e permanecem verdadeiras no mundo das paríiculas subatômicas (onde

rande em relação ao eixo de rotação e

reina a física quânica). Nenhuma exceção à lei de conservação do momento anguuma velocidade angular relativamente lar jamais foi descoberta.

pequena. (b) Diminuindo o momento

Discutiremos a seguir quaro exemplos que envolvem esta lei.

de inércia, o estudante automaticamente

aumenta a velocidade angular. O

1. *Aluno que gra* A Fig. 11-16 mosra um estudante sentado em um banco que pode momento angular *L* do sistema

girar livremente em torno de um eixo verical. O estudante, que foi posto em ropermanece inalterado.

tação com uma pequena velocidade angular inicial w *1*, segura dois halteres com

os braços abertos. O vetor momento angular *L* do estudante coincide com o eixo

de rotação e aponta para cima.

O professor pede ao estudante para fechar os braços; esse movimento reduz

o momento de inércia do valor inicial I; para um valor menor/' pois a massa dos

halteres ica mais próxima do eixo de rotação. A velocidade angular do estudante

aumenta consideravelmente, de *W;* para *w1* O estudante pode reduzir a velocidade angular estendendo novamente os braços para afastar os halteres do eixo de rotação.

Nenhum toque externo resultante age sobre o sistema formado pelo esudante,

o banco e os halteres. Assim, o momento angular do sistema em relação ao eixo

de rotação permanece constante, independentemente do modo como o estudante

segura os halteres. Na Fig. l 1-16a, a velocidade angular w; do estudante é relaivamente baixa e o momento de inércia I; é relativamente alto. De acordo com a Eq. 11-34, a velocidade angular na Fig. 11-16b deve ser maior para compensar

a redução de I'

2. *Salto de trampolim* A Fig. 11-17 mosra uma atleta executando um salto duplo e

meio mortal carpado. Como era de se esperar, o cenro de massa descreve uma

trajetória parabólica. A atleta deixa o rampolim com um momento angular L

em relação a um eixo horizontal que passa pelo cenro de massa, representado

por um vetor perpendicular ao papel na Fig. 11-17. Quando a mergulhadora está

no ar, não sofre nenhum torque exteno e, portanto, o momento angular em torno

do mesmo eixo não pode variar. Levando braços e pernas para a *posição carpada,* reduz consideravelmente o momento de inércia em torno desse eixo e assim, de acordo com a Eq. 11-34, aumenta consideravelmente a velocidade angular.

O momento angular da

Quando passa da posição carpada para a *posição esticada* no inal do salto, o

nadadora é constante,

momento de inércia aumenta e a velocidade angular diminui o suiciente para

mas ela pode mudar a

a atleta mergulhar espirrando o mínimo possível de água. Mesmo em um salto

velocidade de rotação.

mais complicado, que envolva também um movimento de parafuso, o momento

angular da mergulhadora é conservado, em módulo *e* orientação, durante todo

-

o salto.

- -

3. *Salto em distância* Quando uma atleta deixa o solo em uma prova de salto em Figura 11-17 O momento angular distância, a força exercida pelo solo sobre o pé de impulsão imprime ao corpo *L* da nadadora é constante durante o uma rotação para a frente em tomo de um eixo horizontal. Essa rotação, caso não salto, sendo representado pela origem seja controlada, impede que o atleta chegue ao solo com a postura correta: na ® de uma seta perpendicular ao plano descida, as pernas devem esar juntas e estendidas para a rente, para que os cal do papel. Note também que o cenro de canhares toquem a areia o mais longe possível do ponto de partida Depois que a massa da nadadora (representado pelos atleta deixa o solo, o momento angular não pode mudar (é conservado), já que não pontos) segue uma rajetória parabólica.

existe nenhum torque externo. Enretanto, a atleta pode transferir a maior parte

do momento angular para os braços, fazendo-os girar em um plano verical (Fig.

11-18). Com isso, o corpo permanece na orientação correta para a parte inal do

salto.

4. *Tour jeté* Em um *tour jeté,* uma bailarina salta com um pequeno movimento

de rotação, mantendo uma pena verical e a outra perpendicular ao corpo (Fig.

11-19a). A velocidade angular é ão pequena que pode não ser percebida pela plateia. Enquanto a bailarina está subindo, movimenta para baixo a pena que estava levantada e levanta a outra pena, fazendo com que ambas assumam um ângulo

} com o corpo Fig. 11-19b). O movimento é elegante, mas também serve para

Figura 11-18 No salto em disância,

a rotação dos braços ajuda a manter o

corpo na orientação coreta para a parte

final do salto.

$-\vec{L}_r$
ω_r
ω_c

$\vec{L}_r$

$\vec{L}_r$
ω_r

Figura 11-19 (a) Parte inicial de um

***tour jeté:* o momento de inércia é rande**

e a velocidade angular é pequena. (b)

Parte intermediária: o momento de

inércia é menor e a velocidade angular

,

.

e IOr.

e

(a)

(b)

aumentar a velocidade angular, já que o momento de inércia da bailarina é menor na nova posição. Como o corpo da bailarina não está sujeito a nenhum torque exteno, o momento angular não pode variar. Assim, se o momento de inércia diminui, a velocidade angular deve aumentar. Quando o salto é bem executado, a impressão para a plateia é a de que a bailarina começa a girar de repente e executa

uma volta de 180° antes que as orientações iniciais das prnas sejam invertidas

em preparação para o pouso. Quando uma das pernas é novamente estendida, a

rotação parece desaparecer magicamente.

•

TESTE 7

Um besouro-rinoceronte está na borda de um pequeno disco que gira como um carrossel.

Se o besouro se desloca em dição ao centro do disco, as seguintes grandezas (todas em

relação ao eixo cenral) aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas: (a) momento

de inércia, (b) momento angular e (c) velocidade angular?

Exemplo

Consevação do momento angular: rotação de uma roda e de um banco

A Fig. ll-20a mosra um estudante, novamente sentado m2• (O chumbo serve para aumentar o valor do momento em um banco que pode girar livremente em tono de um de inércia.) A roda gira com uma velocidade angular w, eixo vertical. O estudante, inicialmente em repouso, segura de 3,9 revis; visa de cima, a roação é no sentido anti-houma roda de bicicleta cuja borda é feita de chumbo e cujo rário. O eixo da roda é verical e o momento angular *L,* momento de inércia /, em relação ao eixo cenral é 1,2 kg apona verticalmente para cima. O estudante inverte a roda O estudante agora

possui um momento

angular e a resultante

_+ *1* - desses dois vetores é

Lc ,- L,

igual ao vetor inicial.

J

Inidal

Final

(e)

Figura 11 -20 (a) Um estudante segura uma roda de bicicleta

que gira em tono de um eixo vertical. (b) O estudante inverte

a roda e o banco começa a girar. (e) O momento angular total

(a)

(b)

do sistema é o mesmo antes e depois da inversão.

que, vista de cima, passa a girar no senido horário (Fig.

mento angular toal do sistema é conservado em relação

11-20b); o momento angular agora é *-L,* . A inversão faz

a qualquer eixo verical.

com que o estudante, o banco e o centro da roda girem

juntos, como um corpo rígido composto, em tomo do eixo *Cálculos* A conservação de L,0, está representada por vede rotação do banco, com um momento de inércia Ic = 6,8 tores na Fig. 1 l-20c. Podemos também escrever essa conkg · m2• (O fato de a roda estar girando não afeta a disri servação em termos das componentes vericais: buição de massa do corpo composto, ou seja, Ic possui o

mesmo valor, independentemente de a roda estar girando

Lcj + L,J = Lc,i + L,;

(11-35)

ou não.) Com que velocidade angular w

em que os índices *i* e/indicam o estado inicial (antes da inc e em que senido

o corpo composto gira após a inversão da roda?

versão da roda) e o estado inal (depois da inversão). Como

a inversão da roda inverteu o momento angular associado à rotação da roda, subsituímos *L*,

I D EIAS-CHAVE

***1* por - *L*,,;· Fazendo**

Lc; = O (pois o estudante, o banco e o cenro da roda estão

3. A soma dos vetores L

J

r

c e L, fornece o momento angular

-

e

total L, do sistema formado pelo estudante, o banco e

(2)(1,2 kg· 1112)(3,9 revis)

01

a roda

6,8 kg

= 1,4 revis.

·n12

4. Quando a roda é inveida, nenhum torque exteno re

(Resosta)

sultante age sobre o sistema para mudar L, em relação Este resultado posiivo mosra que o estudante gira no sen01

a qualquer eixo vertical. (Os torques produzidos por ido antihorário em torno do eixo do banco, quando visto forças entre o estudante e a roda quando o estudante de cima. Se quiser parar de rodar, o estudante terá apenas inverte a roda são intenos ao sistema.) Assim, o mo-que inverter novamente a roda.

Exemplo

Consevação do momento angular: barata sobre um disco

Na Fig. 11-21, uma barata de massa *m* está sobre um

disco de massa *6,00m* e raio *R*. O disco gira como um

carrossel em torno do eixo central, com velocidade angular w = 1,50 ra/s. A barata está inicialmente a uma distância r

R

= 0,800R do centro do disco, mas rasteja até

a borda do disco. Trate a barata como se fosse uma par

Eixo de rotação

tícula. Qual é a velocidade angular do inseto ao chegar

à borda do disco?

Figura 11-21 Uma baraa esá a uma disância r do cenro de

um disco que gira como um carossel.

IDEIAS-CHAVE

(1) Ao se deslocar, a barata muda a distibuição de massa

(e, portanto, o momento de inércia) do sistema baratadisco. e o momento de inércia Para começar, vamos calcular o (2) O momento angular do sistema não vaia porque não momento de inércia do sistema baratadisco antes e depois está sujeito a nenhum torque exteno. (As forças e torques do deslocamento da barata.

associados ao movimento da barata são intenos ao sistema.)

De acordo com a Tabela 10-2c, o momento de inércia

!

(3) O módulo do momento angular de um coro íido ou de um disco que gira em tomo do eixo central é *MR2*•

de uma partícula é dado ela Eq. 11-31 (L = Iw).

Como *M = 6,00m,* o momento de inércia do disco é

***Cálculos* Podemos determinar a velocidade angular inal**

l1 = 3,00mR2.

(11-36)

igualando o momento angular final *L1* ao momento angu (Não conhecemos os valores de *me* R, mas vamos prosselar inicial L;, já que ambos envolvem a velocidade angular guir com a coragem radicional dos físicos.)

$I_i = I_d + I_{bi} = 3{,}64mR^2,$

De acordo com a Eq. 10-33, o momento de inércia e o momento de inércia fmal é

da barata (supondo que se comporta como uma parícula)

I

é *mr2.* Subsituindo os valores da distância inicial entre a

r = ,1 + Ih' = 4,00,n /? 2.

(1 1-40)

barata e o cenro do disco (r = 0,800R) e da distância final

Em seguida, usamos a Eq. 11-31 *(L = Iw)* para levar

***(r = R),* descobrimos que o momento de inércia inicial da em conta o fato de que o momento angular final *L1* do sisbarata em relação ao eixo de rotação é tema é igual ao momento angular inicial L;:**

'"' = 0.64rn /? 2

(L l-37)

[illegible] = [illegible]

e que o momento de inércia inal em relação ao mesmo ou

4,00n1R *2wr* = [illegible] rad/s).

.

,

eXo e

_1 = 1nR *2*•

(1 1-38) Depois de cancelar as incógnitas m e R, obtemos

Assim, o momento de inércia inicial do sistema barata

***wt* = 1,37 rad/s.**

(Resposta)

disco é

Observe que a velocidade angular diminuiu porque a distân

(1 1-39) cia enre parte da massa e o eixo de rotação aumentou.

1 1 -12 Precessão de um Giroscópio

Um giroscópio simples é formado por uma roda ixada a um eixo e livre para girar

em tono do eixo. Se uma das extremidades do eixo de um giroscópio *estacionário*

é apoiada em um suporte, como na Fig. l l-22a, e o giroscópio é liberado, o giroscópio cai, girando para baixo em tono da exremidade do suporte. Como a queda envolve uma rotação, é govenada pela segunda lei de Newton para rotações, que é

dada pela Eq. 11-29:

dL

7 = *dt*

(11-41)

De acordo com a Eq. 11-41, o torque que causa a rotação para baixo (a queda) faz

variar o momento angular *L* do giroscópio a parir do valor inicial, que é zero. O torque f é produzido pela força gravitacional Mg sobe o cenro de massa do giroscópio, que tomamos como o cenro da roda. O braço de alavanca em relação à exremidade

do suporte, situada no ponto *O* da Fig. 1 l-22a, é *r.* O módulo de r é

7 = *Mgr* sen 90º = *Mgr*

(11-42)

G á que o ângulo enre Mg e *r* é 90°) e o senido é o que aparece na Fig. l 1-22a.

Um giroscópio que gira rapidamente se comporta de oura forma. Suponha que

o giroscópio seja liberado com o eixo ligeiramente inclinado para cima. Nesse caso,

começa a cair, girando em tono de um eixo horizontal que passa por *O,* mas, em

seguida, com a roda ainda girando em tono do eixo, passa a girar horizontalmente

em tomo de um eixo verical que passa pelo ponto *O,* em um movimento chamado

de preessão.

Por que o giroscópio em rotação permanece suspenso em vez de cair, como o

giroscópio estacionário? Isso acontece porque, quando o giroscópio em roação é

liberado, o torque produzido pela força ravitacional, *g*, faz variar, não um momento angular inicialmente nulo, mas um momento angular já existente, raças à rotação da roda.

Para entender por que esse momento angular inicial leva à precessão, considere o momento angular L do giroscópio devido à rotação da roda Para simpliicar a situação, suponha que a roação é tão rápida que o momento angular devido à precessão é desprezível em relação a *i*. Suponha também que o eixo do giroscópio se encontra na horizontal quando a precessão começa, como na Fig. 1 l-22b. O módulo

de i é dado pela Eq. 11-31:

$L = lw$,

(1 1-43)

$$K = \tfrac{1}{2}I_{CM}\omega^2 + \tfrac{1}{2}Mv_{CM}^2,$$

onde *I* é o momento de inércia do giroscópio em torno do eixo e w é a velocidade *z*

angular da roda. O vetor *L* aponta ao longo do suporte, como na Fig. l 1-22b. Como

L* é paralelo a r , o torque r é perpendicular a *L.

De acordo com a Eq. 11-41, o torque ' causa uma variação incremental *dL*

do momento angular do giroscópio em um intervalo de tempo incremental *dt,* ou

.

seJa,

X

d[= T dt.

(l l-44)

Mg

Suporte

Entretanto, no caso de um giroscópio que *gira rapidamente,* o módulo de *L*

(a)

é i

xado pela Eq. 11-43. Assim, o torque pode mudar a orientação de *L,* mas não o

módulo.

z

De acordo com a Eq. 11-44, a orientação de *dL* é a mesma de *r,* perpendicular

a *L.* A única maneira pela qual *L* pode variar na direção de ' sem que o módulo *L*

seja alterado é girar em torno do eixo *z,* como na Fig. l 1-22c. Assim, *L* conserva o módulo, a exremidade do vetor *L* descreve uma rajetória circular e ' é sempre

tangente a essa rajetória. Como *L* tem que apontar na direção do eixo da roda, o

X

eixo tem que girar em torno do eixo *z* na direção de '. Essa é a origem da precessão.

Mg

Como o giroscópio em rotação obedece à segunda lei de Newton para roações em

resposta a qualquer mudança do momento angular inicial, realiza uma precessão em

(b)

vez de simplesmente tombar.

Podemos calcular a velocidade de precessão n usando primeiro as Eqs. 11-44

Trajetória circular

e 11-42 para obter o módulo de *dL:*

da extre1nidade

-

z

do vetor *L*

$dL = \text{r}\ dt = Mgr\ dt.$

(11-45)

***o* -**

Quando *L* varia de um valor incremental durante um tempo incremenal *dt,* o eixo e *y*

***P* - *L t*+**

***L* precessam em tono do eixo *z* de um ângulo incremental *d*>. (Na Fig. 11-22c, o**

L

ângulo *d*> está exagerado para maior clareza.) Com a ajuda das Eqs. 11-43 e 11-45,

X

dt

descobrimos que *d*> é dado por

(e)

d

d

Mgrrlt

/> = /_

-

Figua 11-22 *(a)* Um giroscópio

L

lw

parado gira em um plano *xz* devido

Dividindo essa expressão por *dt* e fazendo a velocidade de precessão n igual a ao torque - produzido pela força gravitacional. *(b)* Um giroscópio que

d>ldt, obtemos:

gira rapidamente com momento angular

n

L executa um movimento de precessão

= *\fgr*

icJ

(velidade de precessão).

(11-46)

em torno do eixo *z.* O movimento de

precessão acontece no plano *y.* (e) A

Este resultado é válido contanto que a velocidade angular w seja elevada. Note que variação *dL* / *dt* do momento angular n diminui quando w aumenta. Observe ambém que não haveria precessão se a for leva a uma rotação de *L* em torno de *O.*

ça gravitacional *g* não agisse sobre o giroscópio; enretanto, como *I* é uma função linear de *M,* as massas no numerador e denominador da Eq. 11-46 se cancelam, ou seja, n não depende da massa do corpo.

A Eq. 11-46 ambém é válida quando o eixo do giroscópio faz um ângulo diferente de zero com a horizontal e, portanto, pode ser aplicada a um pião de brinquedo.

1

REVISÃO E RESUMO

1

Copos em Rolamento No caso de uma roda de raio *R* rolan do ponto *P* do "piso" que está em conato com a roda. A velocidade do suavemente,

angular da roda em tono desse ponto é igual à velocidade angular

v

da roda em torno do centro. Uma roda que rola possui uma energia

***M* = *wR*,**

(11-2) cinética dada por

em que VcM é a velocidade linear do centro de massa da roda e *w* é

a velocidade angular da roda em tono do cenro. A roda pode m

'11-5)

bém ser vista como se estivesse girando instananeamente em tono em que lcM é o momento de inércia da roda em relação ao centro de

onde f' é o torque resultante que age sobre a partícula e e é o mo-

mento angular da parícula.

lcM = *aR*.

(1 1-6)

Se a roda desce uma rampa de ângulo

Momento Angular de um Sistema de Partículas O mo

***J* rolando suavemente, a aceleração ao longo de um eixo *x* paralelo à rampa é dada por mento angular L de um sistema de partículas é a soma vetorial dos**

momentos angulares das partículas:

***g* sen8**

***OcM,x* = - J**

(1 1-10)

li

***i* = ê1 + *ê2* + · · · + *!n* = I *e,*.**

(11-26)

;- 1

O Torque como um Vetor Em três dimensões, o *torque* - é uma A taxa de variação com o tempo do momento angular é igual ao grandeza vetorial defmida em relação a um ponto fixo (em geral, a torque exteno resultante que age sobre o sistema (a soma vetorial origem) aravés da equação

dos torques produzidos pelas interações das partículas do sistema

r = 7 x *F*,

(1 1-14) com parículas extenas ao sistema):

onde Fé a força aplicada à partícula e *r* é o vetor posição da partí

= *dL*

cula em relação ao ponto ixo. O módulo de f é dado por

Tcs

dt

(sistema de partículas).

(11-29)

(1 1-15, 1 1-16. l l-17) Momento Angular de um Corpo Rígido Para um corpo rígionde p é o ângulo entre F e r, *F.* é a componente de F perpendi do que gira em tono de um eixo ixo, a componente do momento cular a r e *r.* é o braço de alavanca de F. A orientação de f é dada angular paralela ao eixo de roação é pela regra da mão direita.

L = l<v

(copo rígido. eixo lixo}.

(11-31)

Momento Angular de uma Partícula O *momento angular* 1 de

uma partícula com momento linear p, massa m e velocidade linear Conservação do Momento Angular O momento angular L

v é uma grandeza vetorial definida em relação a um ponto ixo (em de um sistema permanece constante se o torque exteno resulante geral a origem) através da equação

que age sobre o sistema é nulo:

tono de um eixo vertical que passa pelo suporte, um movimento de

onde > é o ângulo enre *r* e p, *p* .1 e *v* . são as componentes de p e *v* precessão com velocidade angular perpendiculares a *r* e r. é a distância perpendicular entre o ponto ixo e

a extensão de p. A orientação de € é dada pela rera da mão direia.

l = *11gr*

.

***1w* ·**

(11-46)

Segunda Lei de Newton para Rotações A segunda lei de onde *M* é a massa do giroscópio, ré o braço de alavanca, *I* é o mo

Newton para a rotação de uma parícula pode ser escrita na forma mento de inércia e *w* é a velocidade angular do giroscópio.

P E R G U N T A S

1 A Fig. 1 1-23 mosra três partículas de mesma massa e mesma 2 A Fig. 11-24 mosra duas parículas, *A* e *B,* nas coordenadas (1

velocidade escalar consante que se movem nas orientações indi m, 1 m, O) e (1 m, O, 1 m). Sobre cada partícula agem três forças cadas pelos vetores velocidade. Os pontos *a, b, e* e *d* formam um numeradas de mesmo módulo, cada uma paralela a um dos eixos.

quadrado, com o ponto *e* no cenro. Ordene os pontos de acordo com (a) Qual das forças produz um torque em relação à origem paralelo o módulo do momento angular resultante em relação aos pontos do a *y?* (b) Ordene as forças de acordo com o módulo do torque em r e sistema de rês partículas, em ordem decrescente.

lação à origem que aplicam às partículas, em ordem decrescente.

a

b

A

3

• *e*

2

4

:

-*f*-,_-- *x*

d

e

z

Figura 1 1-23 Pergunta 1 .

Figura 11 -24 Pergunta 2.

B

6

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

3 O que acontece ao ioiô inicialmente estacionário da Fig. 11-25 co, (b) momento angular e velocidade angular do besouro e (c) o se é puxado, com o auxilio da corda, (a) pela força F *2* (cuja linha de momento angular e velocidade angular do disco? (d) Quais são as ação passa pelo ponto de contato do ioiô com a mesa, como mostra respostas se o besouro caminha no sentido oposto ao da rotação?

a igura), (b) pela força i (cuja a linha de ação passa acima do ponto 8 A Fig. 11-27 mostra uma vista superior de uma placa retangular de contato) e (c) pela força F; (cuja linha de ação passa à direita do que pode girar como um carrossel em tomo do cenro *O.* Também ponto de contato)?

-

são mostradas sete rajetórias ao longo das quais bolinhas de goma

de mascar podem ser jogadas (todas com a mesma velocidade es

Fg

calar e mesma massa) para grudar na placa estacionária. (a) Ordene

as trajetórias, em ordem decrescente, de acordo com a velocidade

angular da placa (e da goma de mascar) após a goma grudar. (b)

Para que trajetórias o momento angular da placa (e da goma) em

relação ao ponto *O* é negativo do ponto de vista da Fig. 11-27?

1

Figua 1 1-25 Pergunta 3.

1

1

7

4 O vetor posição *r* de uma partícula em relação a um certo ponto tem um módulo de 3 m e a força F aplicada à partícula tem um Figura 11 -27 Pergunta 8.

6

módulo de 4 N. Qual é o ângulo entre *r* e F se o módulo do torque

associado é igual (a) a zero e (b) a 12 N · m?

9 A Fig. 11-28 mostra o módulo do momento angular *L* de uma

5 Na Fig. 1 1-26, três forças de mesmo módulo são aplicadas a uma roda em função do tempo *t.* Ordene os quatro intervalos de tempo, parícula localizada na origem (; é aplicada perpendicularmente indicados por letras, de acordo com o módulo do torque que age ao plano do papel). Ordene as forças de acordo com o módulos do sobre a roda, em ordem decrescente.

torque que produzem (a) em relação ao ponto Pi, (b) em relação ao

ponto *P2* e (c) em relação ao ponto *P3,* em ordem decrescente.

L

y

- Figura 11-28 Pergunta 9.

1 A

B* I *C

:1

,--

<) ---->-

-*x* 1 O A Fig. 1 1-29 mosra uma partícula se movendo com velocida-

Pi

i

de constante *v* e cinco pontos com suas coordenadas *y*. Ordene os pontos de acordo com o módulo do momento angular da partícula

Figua 1 1-26 Pergunta 5.

em relação a eles, em ordem decrescente.

6 O momento angular *f(t)* de uma partícula em quatro situações é

y

(1) *e*= *3t* + 4; (2) *e*= *-6t2;* (3) *e*= 2; (4) *e*= *4ft.* Em que situação o torque resultante que age sobre a parícula é (a) zero, (b) positivo

e• (1, 3)

e consante, (c) negaivo e com o módulo crescente para *t* > O e (d)

a

-

negativo e com o módulo decrescente para *t* > O?

v

e

(- 3, 1) •------ [illegible] 1)

7 Um besouro-rinoceronte está na borda de um disco horizontal

- [illegible]

-x

que gira como um carossel no sentido antihorário. Se o besouro

caminha ao longo da borda no sentido da rotação, o módulo das

d• (4, - l)

b

grandezas a seguir (medidas em relação ao eixo de rotação) aumen

(-1,- 2) •

ta, diminui ou permanece o mesmo (com o disco ainda girando no

sentido ani-horário): (a) momento angular do sistema besouro-dis-
Figura 11 -29 Pergunta 10.

P R O B L E M A S

1

• • - O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponívei s em O *Circo Voador da Ffsica* de Jearf Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 11-2 O Rolamento como uma Combinação de

unitários, qual é a velocidade v (a) no cenro, (b) no alto e (c) na

Translação e Rotação

base de cada pneu e o módulo a da aceleração (d) no centro, (e) no

•1 Um carro se move a 80,0 /h em uma estrada plana no senti alto e () na
base de cada pneu? Em relação a uma pessoa parada no do positivo de

um eixo *x*. Os pneus têm um diâmetro de 66 cm. Em acostamento da esrada e em termos dos vetores unitários, qual é a relação a uma mulher que viaja no carro e em termos dos vetores velocidade *v* (g) no centro, (h) no alto e (i) na base de cada pneu e

v (m/s)

o módulo da aceleração *a* (j) no cenro, (k) no alto e l) na base de ••8 A Fig. 11-32 mostra a energia potencial *U(x)* de uma bola cada pneu?

maciça que pode rolar ao longo de um eixo *x.* A escala do eixo *U*

•2 Um automóvel que se move a 80 h possui pneus com 75,0 é deida por *U,* = 100 J. A bola é homogênea, rola suavemente e cm de diâmetro. (a) Qual é a velocidade angular dos pneus em re possui uma massa de 0,400

kg. Ela é liberada em *x* = 7 ,O m quando lação aos respectivos eixos? (b) Se o carro é freado com aceleração se move no sentido negativo do eixo *x* com uma energia mecâni constante e as rodas descrevem em 30 volas completas (sem des ca de 75 J. (a) Se a bola pode chegar ao ponto *x* = O m, qual é sua lizamento), qual é o módulo da aceleração angular das rodas? (c) velocidade nesse ponto, e se não pode, qual é o ponto de retorno?

Que distância o carro percorre durante a renagem?

Suponha que a bola esteja se movendo no sentido positivo do eixo

***x* ao ser liberada em *x* = 7 ,O m com 7 5 J. (b) Se a bola pode chegar Seção 1 1 ·4 As Forças do Rolamento**

ao ponto *x* = 13 m, qual é sua velocidade nesse ponto e se não pode,

•3 Um aro de 140 kg rola em um piso horizontal de tal forma que qual é o ponto de retorno?

o centro de massa tem uma velocidade de 0,150 /s. Qual é o rabalho necessário para fazê-l o parar?

U(J)

. '

,_

•4 Uma esfera maciça homogênea rola para baixo em um plano inclinado. (a) Qual deve ser o ângulo de inclinação do plano para que

,_

. --

****

a aceleração linear do centro da esfera tenha um módulo de O,lOg?

•

(b) Se um bloco sem atrito deslizasse para baixo no mesmo plano

'

inclinado, o módulo da aceleração seria maior, menor ou igual a

'

-

O,lOg? Por quê?

2 4 6 8 10 12 14

•5 Um carro de 1000 kg tem quaro rodas de 10 kg. Quando o car Figura 11-32 Problema 8.

O

***X* (tI)**

ro está em movimento, que fração da energia cinéica total se deve

à rotação das rodas em tono dos respectivos eixos? Suponha que

as rodas têm o mesmo momento de inércia que discos homogêneos ••9 Na Fig. 11-33, uma bola maciça rola suavemente a partir do de mesma massa e tamanho. Por que não é preciso conhecer o raio repouso (começando na altura *H* = 6,0 m) até deixar a parte h o das rodas?

rizontal no fim da pista, a uma altura *h* = 2,0 m. A que distância

horizontal do ponto *A* a bola toca o chão?

••6 A Fig. 11-30 mosra a velocidade escalar vem função do tempo

***t* para um objeto de 0,500 kg e 6,00 cm de raio que rola suavemente**

para baixo em uma rampa de 30º. A escala do eixo das velocidades

é deinida por v, = 4,0 m/s . Qual é o momento de inércia do obje

r

to?

H

v,

l --T

:====Ai

.

t

***v/* Figura 11-33 Problema 9.**

/

••10 Uma esfera oca, com0,15 mderaio e momento de inércia/ =

/

0,040 kg · m2 em relação a uma reta que passa pelo centro de massa,

1/

rola sem deslizar, subindo uma superície com uma inclinação de

o 0

30º em relação à horizontal. Em uma certa posição inicial, a energia

,2 0,4 0,6 0,8

1

Figua 1 1-30 Problema 6.

***t* (s)**

cinética total da esfera é 20 J. (a) Quanto desta energia cinética inicial se deve à rotação? (b) Qual é a velocidade do centro de massa da esfera na posição inicial? Após a esfera ter se deslocado 1,0 m

• • 7 Na Figura 11-31, um cilindro maciço com 1 O cm de raio e uma ao longo da superfície inclinada a partir da posição inicial, qual é massa de 12 kg parte do repouso e rola para baixo uma distância (c) a energia cinética total e (d) a velocidade do centro de massa?

***L* = 6,0 m, sem deslizar, em um telhado com uma inclinação } =**

30º. (a) Qual é a velocidade angular do cilindro em relação ao eixo •• 11 Na Fig. 11-34, uma força horizontal consante F de módulo central ao deixar o telhado? (b) A borda do telhado está a uma al 10 N é aplicada a uma roda de massa 10 kg e raio 0,30 m. A roda tura *H* = 5,0 m. A que disância horizontal da borda do telhado o rola suavemente na superície horizonal e o módulo da aceleração cilindro atinge o chão?

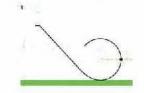
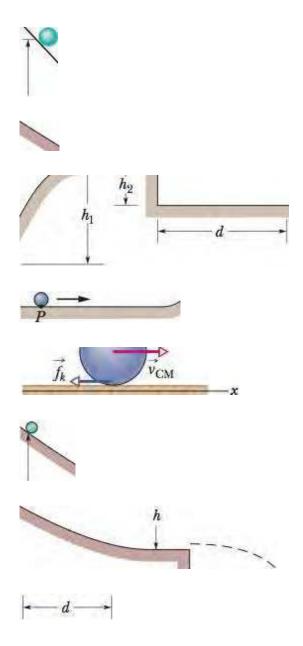
do cenro de massa é 0,60 /s2• (a) Em termos dos vetores unitários,

qual é a força de atrito que age sobre a roda? (b) Qual é o momento

de inércia da roda em relação ao eixo de roação, que pssa pelo

centro de massa?

Figura 11-31 Problema 7.

Figura 11 -34 Problema 11.

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

311

••12 Na Fig. 11-35, uma bola maciça de latão de massa 0,280 g bola desliza? () Qual é a velocidade linear da bola quando começa rola suavemente ao longo do trilho quando é liberada a partir do a rolar suavemente?

repouso no recho retilíneo. A parte circular do trilho tem um raio

***R* = 14,0 cm e a bola tem um raio *r* << *R.* (a) Quanto vale *h* se a bola esá na iminência de perder contato com o trilho quando chega ao ponto mais alto da parte curva do rilho? Se a bola é liberada a uma altura *h = 6,00R,* qual é (b) o módulo e (c) a orientação da Figura 11 -38 Problema 15.**

componente horizontal da força que age sobre a bola no ponto *Q?* •••16 *Objeto cilíndico não homogêneo.* Na Fig. 11-39, um objeto cilíndrico de massa Me raio *R* rola suavemente descendo uma rampa,

a partir do repouso, e passa para um trecho horizontal da pista. Em

seuida, rola para fora da pista, pousando a uma distância horizontal

h

l

***Y Q d* = 0,56 m do inal da pisa. A alura inicial do objeto é *H* = 0,90**

m; a extremidade da pisa esá a uma altura *h* = 0,10 m. O objeto é

composto por uma camada cilíndrica extena homogênea (com uma

Figura 1 1-35 Problema 12.

cera massa especíica) e um cilindro central, ambém homogêneo

(com uma massa esecíica diferente). O momento de inércia do ob

•••13 *Bola não homogênea.* Na Fig. 11-36, una bola de massaM jeto é dado pela expressão geral *I = 3MR2,* mas 3 não é iual a 0,5, e raio *R* rola suavemente, a partir do repouso, descendo ua rampa como no caso de um cilindro homogêneo. Determine o valor de 3.

e passando por uma pista circular com 0,48 m de raio. A altura inicial da bola é *h* = 0,36 m. Na parte mais baixa da curva, o módulo da força

normal que a pista exerce sobre a bola é *2,00Mg.* A bola

é formada por uma casca esérica extena homogênea (com uma

certa massa especíica) e uma esfera cenral, também homogênea

H

(com uma massa específica diferente). O momento de inércia da

bola é dado pela expressão geral I = 3MR2, mas 3 não é igual a

_ 1

0,4, como no caso de uma bola homogênea. Determine o valor de

T

3 .

Figura 11-39 Problema 16.

Seão 11-5 O Ioiô

h

• 17 _ Um ioiô possui um momento de inércia de 950 g · cm2

Figura 1 1-36 Problema 13.

e uma massa de 120 g. O raio do eixo é 3,2 mm e a corda tem 120

cm de comprimento. O ioiô rola para baixo, a partir do repouso, até

•••14 Na Fig. 11-37, uma bola pequena, maciça, homogênea é a exremidade da corda. (a) Qual é o módulo da aceleração linear lançada do ponto *P,* rola suavemente em uma superície horizontal, do ioiô? (b) Quanto tempo o ioiô leva para chegar à exremidade da sobe uma rampa e chega a um platô. Em seguida, deixa o platô ho corda? Ao chegar à exremidade da corda, qual é (c) a velocidade rizontalmente para pousar

em outra superície mais abaixo, a uma linear, (d) a energia cinética de translação, (e) a energia cinéica de distância horizontal *d* da exremidade do platô. As alturas verticais rotação e () a velocidade angular?

são h1 = 5,00 cm e *i* = 1,60 cm. Com que velcidade a bola deve • 18

Em 1980, sobre a baía de San Francisco, um grande ioiô

ser lançada no ponto *P* para pousar em *d* = 6,00 cm?

foi solto de um uindaste. O ioiô de 116 kg era formado por dois

discos homogêneos com 32 cm de raio, ligados por um eixo com

3,2 cm de raio. Qual foi o módulo da aceleração do ioiô (a) durante

a descida e (b) durante a subida? (c) Qual foi a tensão da corda? (d)

A tensão estava próxima do limite de resistência da corda, 52 kN?

Bola

Suponha que você construa uma versão ampliada do ioiô (com a

mesma forma e usando os mesmos materiais, porém maior). (e) O

módulo da aceleração do seu ioiô durante a queda será maior, m e

Figura 1 1-37 Problema 14.

nor ou igual ao do ioiô de San Francisco? () E a tensão da corda?

••• 1 5

Um jogador de boliche arremessa uma bola de raio Seão 11-6 Revisão do Toque

***R* = 11 cm ao longo de uma pista. A bola (Fig. 11-38) desliza na pista com velocidade inicial**

•19 Em termos dos vetores unitários, qual é o torque resultante

VcM = 8,5 /s e velocidade angular

inicial eu

em relação à origem a que está submetida uma pulga localizada nas

0 = O. O coeiciente de atrito cinético entre a bola e a pista é 0,21. A força de arito cinético , que age sobre a bola produz coordenadas (O; -4,0 m; 5,0 m) quando as forças i = (3,0 N)k e

•

A

uma aceleração linear e uma aceleração angular. Quando a veloci F; = (-2,0 N)j agem sobre a pulga?

dade VcM diminui o suiciente e a velocidade an

•20

ular eu aumena o

Uma ameixa esá localizada nas coordenadas (-2,0 m; O; 4,0

suiciente, a bola para de deslizar e passa a rolar suavemente. (a) m). Em termos dos vetores unitários, qual é o torque em relação à Qual é valor de VcM em termos de eu nesse insante? Durante o des origem a que está submetida a ameixa se esse torque se deve a uma lizamento, qual é (b) a aceleração linear e (c) a aceleração anular força F cuja única componente é (a) Fx = 6,0 N, (b) Fx = -6,0 N, da bola? (d) Por quanto tempo a bola desliza? (e) Que disância a (c) F, = 6,0 N, (d) F, = -6,0 N?

•21 Em termos dos vetores unitários, qual é o torque em relação à •29 No instante da Fig.11-41, duas parí透culas se movem em um origem a que está submetida uma partícula localizada nas coorde plano *y.* A partícula *P*1 possui uma massa de 6,5 kg e uma velonadas (O; -4,0 m; 3,0 m) se esse torque se deve (a) a uma força i cidade v1 = 2,2 m/s e está a uma distância *d1* = 1,5 m do ponto *O.*

de componentes *F*

A partícula *P*

***1,* = 2,0 N, *F1Y* = *F1,* = O e (b) a uma força *F2* de**

***2* possui uma massa de 3,1 kg e uma velocidade *v2* =**

componentes *F*

3,6 m/s e esá a uma distância *d*

x* = O, *F2* = 2,0 N, *F

***2* = 2,8 m do ponto *O.* Qual é (a) o**

Y

***2,* = 4,0 N?**

••22 Uma partícula se move em um sistema de coordena módulo e (b) a orientação do momento angular resultante das duas das *xyz* sob a ação de uma força . Quando o vetor posição da partículas em relação ao ponto *O?*

A

A

A

-

partícula é *r* = (2, 00 m)i + (3, 00 m) j + (2, 00 m)k, a força é *F* =

A

A

A

F,i + (7,00 N)j -(6,00 N)k e o torque correspondente em relação

A

A

A

à origem é f = (4,00 N · m)i + (2, 00 N · m)j -(1,00N · m)k. Deter-

mine *F,*.

-

A

A

••23 A força *F* = (2, O N)i -(3, O N)k age sobre uma pedra cujo

A

A

vetor posição é *r* = (0,50 m)j -(2,0 m)k em relação à origem. Em Figura 11-41 Problema 29.

termos dos vetores unitários, qual é o torque resultante a que a pedra

está submetida (a) em relação à origem e (b) em relação ao ponto

(2,0 m; O; -3,0 m)?

• •30 No instante em que o deslocamento de um objeto de 2,0 kg em

-

A

A

A

••24 Em termos dos vetores unitários, qual é o torque em rela relação à origem é *d* = (2,00 m)i +(4,00 m)j -(3,00 m)k, a velo-A

A

A

ção à origem a que está submetido um vidro de pimenta localicidade é *v* = - (6,00 m/s)i +(3,00 m/s)j+(3,00 m/s)ke o objeto es-zado nas coordenadas (3,0 m; -2,0 m; 4,0 m) devido (a) à força tá sujeito a uma força F = (6,00 N)i -(8,00 N)] + (4,00 N)k. D e i =(3,0N)i-(4,0N)]+(5,0N)k, (b) à força '

termine (a) a aceleração do objeto, b) o momento angular do objeto

2 =(-3,0 N)i-

'

A

-

-

(4,0 N)j-(5,0 N)k e (c) à soma vetorial de F; e *F*

em relação à origem, (c) o torque em relação à origem a que está

***2* ? (d) Repia o**

item (c) para o torque em relação ao ponto de coordenadas (3,0 m; submetido o objeto e (d) o ângulo enre a velocidade do objeto e a 2,0 m; 4,0 m).

força que age sobre ele.

-

A

A

••25 A força *F* = (-8,0 N)i + (6,0 N)j age sobre uma partícula • •31 Na Fig. 11-42, uma bola de 0,400 kg é lançada verticalmente A

A

para cima com uma velocidade inicial de 40,0 m/s. Qual é o mocujo vetor posição é *r* = (3,0 m)i +(4,0 m)j. Qual é (a) o toque mento angular da bola em relação a *P*, um ponto a uma distância em relação à origem a que está submetida a partícula, em termos horizontal de 2,00 m do

ponto de lançamento, quando a bola está dos vetores unitários; (b) e o ângulo entre *r* e *F ?*

(a) na altura máxima e (b) na meade do caminho de volta ao chão?

Qual é o torque em relação a *P* a que a bola é submetida devido à

Seção 1 1-7 Momento Angular

força gravitacional quando está (a) na alura máxima e b) na m e

•26 No instane da Fig. 11-40, uma partícula *P* de 2,0 kg possui um tade do caminho de volta ao chão?

vetor posição r de módulo 3,0 m e ângulo 81 = 45º e uma velocidade

v* de módulo 4,0 m/s e ângulo *8

y

***2* = 30º. A força *F,* de módulo 2,0**

N e ângulo *83* = 30º, age sobre *P.* Os rês vetores esão no plano *y.*

Quais são, em relação à origem, (a) o módulo e (b) a orientação do

p

Bola

momento angular de *P* e (c) o módulo e (d) a orientação do torque Figura 11-42 Problema 31.

x

que age sobre *P?*

Seção 11-s Segunda Lei de Newton para Rotaões

'

)

-

•32 Uma partícula sofre a ação de dois torques em relação à origem:

F "

f1 tem um módulo de 2,0 N · m e aponta no sentido positivo do eixo

"3 /

/

***x;* r *2* tem um módulo de 4,0 N · m e aponta no sentido negativo do**

/

eixo *y.* Determine *dfldt,* onde 7 é o momento angular da partícula em relação à origem, em termos dos vetores unitários.

•33 No instante *t* = O, uma partícula de 3,0 kg com uma velocida-

A

A

de *v* = (5,0 m/s)i -(6,0 m/s)j está passando pelopontox = 3,0m,

Figura 1 1-40 Problema 26.

***y* = 8,0 m. A partícula é puxada por uma força de 7,0 N no sentido**

negaivo do eixo *x.* Quais são, em relação à origem, (a) o momento

-

A

•27 Em um certo insante, a força *F* = 4, O j N age sobre um objeto angular da partícula, (b) o torque que age sobre a partícula e (c) a A

A

de 0,25 kg cujo vetor posição é r = (2, Oi -2, Okm e cujo vetor ve-taxa com a qual o momento angular esá variando?

A

A

locidade é v = (-5, O i + 5, Ok)m/s. Em relção à origem e em termos •34 Uma partícula se move em um plano *y,* em torno da origem, dos vetores unirios, qual é (a) o momento angular do objeto e b) no sentido horário, do ponto de vista do lado positivo do eixo *z.*

o torque que age sobre o objeto?

Em termos dos vetores unitários, qual é o torque que age sobre a

•28 Um objeto de 2,0 kg, que se comporta como uma parícula, se partícula se o módulo do momento angular da partícula em relação move em um plano com componentes de velocidade v, = 30 m/s e à origem é (a) 4,0 kg · m2/s, b) *4,0t2* kg · m2/s, (c) *4,0r* kg · m2/s v

e (d) *4,0lt2* kg · m2/s?

Y = 60 m/s ao passar por um ponto de coordenadas (3,0; -4,0) m.

Nesse instante, em termos dos vetores unirios, qual é o momento

A

A

••35 No instante *t,* o vetor *r = 4,0t2i-(2,0t + 6,0t2)j* fonece angular do objeto em relação (a) à origem e (b) ao ponto (-2,0; a posição de uma partícula de 3,0 kg em relação à origem de um

-2,0) m?

sistema de coordenadas *y* (r está em meros e *tem* segundos). (a)

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

313

Escreva uma expressão para o torque em relação à origem que age de 2,5 s. Supondo que *R* = 0,50 m e *m* = 2,0 kg, calcule (a) o mosobre a parícula. (b) O módulo do momento angular da partícula mento de inércia da esruura em relação ao eixo de rotação e (b) o em relação à origem está aumentando, diminuindo ou permanece o momento angular da esrutura em relação ao eixo.

mesmo?

Seção 1 1-10 Momento Angular de um Corpo Rígido

Girando em Torno de um Eixo Fixo

•36 A Fig. 11-43 mostra rês discos homogêneos acoplados por

correias. Uma correia passa pelas bordas dos discos *A* e *C;* a outra T

R

passa por um cubo do disco *A* e pela borda do disco *B.* As correias _"

se movem suavemente, sem deslizar nas bordas e no cubo. O disco *A* tem raio *R* e seu cubo tem raio *0,5000R;* o disco *B* tem raio Figura 11-45 Problema 41.

0,2500R; o disco *C* tem raio 2,000R. Os discos *B* e *C* têm a mesma massa especíica (massa por unidade de volume) e mesma espessura. Qual é a razão entre o módulo do momento angular do disco • • 42 A Fig. 11-46 mostra a variação com o tempo do torque *T* que

C* e o módulo do momento angular do disco *B?

age sobre um disco inicialmente em repouso que pode girar como

um carrossel em torno do centro. A escala do eixo *T* é deinida por

Corei

***Ts* = 4,0 N · m. Qual é o momento angular do disco em relação ao**

eixo de rotação no insante (a) *t* = 7,0 s e (b) *t* = 20 s?

r (N • m)

A

e

'

1

" - 1

. .

'

[illegible] m**

rad/s. Quais são, em relação ao ponto *O*, (a) o momento de inércia

do conjunto, (b) o módulo do momento angular da partícula do meio

.

'

e (c) o módulo do momento angular do conjunto?

I

•

1 *I*

1 1 1

m

Figura 11-46 Problema 42.

Seção 1 1-1 1 Consevação do Momento Angular

•43 Na Fig. 11-47, duas patinadoras com 50 kg de massa, que

Figua 1 1-44 Problema 37.

se movem com uma velocidade escalar de 1,4 m/s, se aproximam

em rajetórias paralelas separadas por 3,0 m. Uma das painadoras

carrega uma vara comprida, de massa desprezível, segurando-a em

•38 Um disco de polimento, com momento de inércia 1,2 X 10-3 uma exremidade, e a oura se agarra à outra exremidade ao paskg · m2, está preso a uma broca elétrica cujo motor produz um torque sar pela vara, o que faz com que as patinadoras passem a descrede módulo 16 N · m em relação ao eixo central do disco. Com o torver uma circunferência em tono do cenro da vara. Suponha que o que aplicado durante 33 ms, qual é o módulo (a) do momento angular arito entre as painadoras e o gelo é desprezível. Qual é (a) o raio e (b) da velocidade angular do disco em relação a esse eixo?

da circunferência, (b) a velocidade angular das patinadoras e (c) a

•39 O momento angular de um volante com um momento de inérenergia cinética do sistema das duas patinadoras? Em seguida, as cia de 0,140 kg· m2 em relação ao eixo central diminu i de 3,00 para patinadoras puxam a vara até icarem separadas por uma distância 0,800 kg · m2/s em 1,50 s. (a) Qual é o módulo do torque médio em de 1,0 m. Nesse instante, qual é (d) a velocidade angular das patinarelção ao eixo central que age sobre o volante durante esse perío doras e (e) a energia cinética do sistema? (f) De onde vem a energia do? (b) Supondo uma aceleração angular constane, de que ângulo cinética adicional?

o volante gira? (c) Qual é o trabalho realizado sobre o volante? (d)

Qual é a potência média do volante?

••40 Um disco com um momento de inécia de 7,00 kg · m2 gira

como um carrossel sob o efeito de um torque variável dado por

***T* = (5,00 + 2,00t) N · m. No instante *t* = 1,00 s, o momento angular do disco é 5,00 kg · m2/s. Qual é o momento angular do disco Figura 11-47 Problema 43.**

V

no instante *t* = 3,00 s?

• •41 A Fig. 11-45 mostra uma esrutura rígida formada por um aro •44 Uma baraa de massa 0,17 kg corre no sentido antihorário de raio *R* e massa *m* e um quadrado feito de quaro barras finas de na borda de um disco circular de raio 15 cm e momento de inércia comprimento *R* e massa *m.* A estrutura rígida gira com velocidade 5,0 X 10-3 kg · m2, montado em um eixo vertical com atrito desconstante em tono de um eixo verical, com um período de rotação prezível. A velocidade da barata (em relação ao chão) é 2,0 m/s e

o disco gira no sentido horário com uma velocidade angular w *0* = •50 O rotor de um motor elétrico tem um momento de inércia 2,8 rad/s. A barata encontra uma migalha de pão na borda e, obviamen

Im = 2,0 X 10-3 kg· m2 em relação ao eixo cenral. O motor é usado

te, para. (a) Qual é a velocidade angular do disco deois que a baraa para mudar a orientação da sonda espacial no qual está montado. O

para? A energia mecânica é conservada quando a barata para?

eixo do motor coincide com o eixo central da sonda; a sonda pos

• 45 Um homem está em pé em uma plataforma que gira (sem atrito) sui um momento de inércia *IP* = 12 kg · m2 em relação a esse eixo.

com uma velocidade angular de 1,2 revis; seus braços estão aber Calcule o número de revoluções do rotor necessárias para fazer a tos e ele segura um tijolo em cada mão. O momento de inércia do sonda girar 30º em tono do eixo cenral.

sistema formado por homem, os tijolos e a plataforma em relação •51 Uma roda esá girando livremente com uma velocidade anguao eixo vertical central da plataforma é 6,0 kg · m2• Se, ao mover lar de 800 rev/min em tono de um eixo cujo momento de inércia os braços, o homem reduz o momento de inércia do sistema para é desprezível. Uma segunda roda, inicialmente em repouso e com 2,0 kg · m2, determine (a) a nova velocidade angular da plataforma um momento de inércia duas vezes maior que a primeira, é acoplae (b) a razão enre a nova energia cinéica do sistema e a energia da à mesma haste. (a) Qual é a velocidade angular da combinação cinética inicial. (c) De onde vem a energia cinética adicional?

resulante do eixo e duas rodas? (b) Que fração da energia cinética

•46 O momento de inércia de uma estrela que sore uma conra de rotação inicial é perdida?

ção enquanto gira em tono de si mesma cai para 1 do valor inicial. ••52 Uma barata de massa *m* esá na borda de um disco homog ê

Qual é a razão entre a nova energia cinética de roação e a energia neo de massa *4,00m* que pode girar livremente em tono do cenro antiga?

como um carrossel. nicialmente, a baraa e o disco giram juntos

•47 Uma pista é montada em uma grande roda que pode girar li com uma velocidade angular de 0,260 rad/s. A barata caminha até vremente, com arito desprezível, em tono de um eixo vertical (Fig. metade da distância ao cenro do disco. (a) Qual é, nesse instante, 11-48). Um rem de brinquedo de massa *m* é colocado na pista e, a velocidade angular do sistema baratadisco? (b) Qual é a razão com o sistema inicialmente em

repouso, a alimentação elétrica do *KI0* enre a nova energia cinética do sistema e a energia cinética brinquedo é ligada. O trem adquire uma velocidade de 0,15 m/s antiga? (c) Por que a energia cinética varia?

em relação à pista. Qual é a velocidade angular da roda se a massa ••53 Uma barra ina homogênea com 0,500 m de comprimento e é l,lm e o raio é 0,43 m? (Trate a roda como um aro e despreze a 4,00 kg de massa pode girar em um plano horizontal em torno de massa dos raios e do cubo da roda.)

um eixo vertical que passa pelo centro da barra. A barra está em

repouso quando uma bala de 3,0 g é disparada, no plano de roação,

em direção a uma das extremidades. Vista de cima, a trajetória da

bala faz um ângulo) = 60,0º com a barra (Fig. 11-50). Se a bala

se aloja na barra e a velocidade angular da barra é 10 rad/s imedia

Figura 1 1-48 Problema 47.

tamente após a colisão, qual é a velocidade da bala imediatamente

antes do impacto?

•48 Uma barata está no cenro de um disco circular que gira livremente como um carrossel, sem torques extenos. A barata caminha Eixo

em direção à borda do disco, cujo raio é *R.* A Fig. 11-49 mostra a

velocidade angular eu do sistema baratadisco durante a caminhada.

A escala do eixo eu é deinida por w. = 5,0 rad/s e wb = 6,0 rad/s.

J

Qual é a razão enre o momento de inércia do inseto e o momento

de inércia do disco, ambos calculados em relação ao eixo de rota

ção, quando a barata chega à borda do disco?

Figura 11 -50 Problema 53.

•

• • 54 A Fig. 11-51 mostra uma vista de cima de um anel que pode

girar em tono do ceno como um carrossel. O raio exteno *R2* é

0,800 m, o raio inteno *Ri* é *R2/2,0,* a massa *M* é 8,00 kg e a massa da cruz no cenro é desprezível. nicialmente, o disco gira com uma velocidade angular de 8,00 rad/s, com um gato de massa *m* =

***M/4,00* na borda externa, a uma distância *R2* do centro. De quan**

o

***R* to o gato vai aumentar a energia cinética do sistema gato-disco se**

Figura 1 1-49 Problema 48.

Disância do cenro

rastejar até a borda intena, de aio *Ri?*

•49 Dois discos estão monados (como um carrossel) no mesmo

eixo, com rolamentos de baixo arito, e podem ser acoplados e girar

como se fossem um só disco. O primeiro disco, com um momento

de inércia de 3,30 kg · m2 em relação ao eixo cenral, é posto para

girar no sentido antihorário a 450 rev/min. O segundo disco, com

um momento de inércia de 6,60 kg · m2 em relação ao eixo cenral, é

posto para girar no sentido antihorário a 900 rev/min. Em seguida,

os discos são acoplados. (a) Qual é a velocidade angular dos discos Figura 11-51 Problema 54

após o acoplamento? Se, em vez disso, o segundo disco é posto

para girar a 900 rev/min no sentido horário, qual é (b) a velocidade ••55 Um disco de vinil horizontal de massa 0,10 kg e raio 0,10 m angular e (c) o sentido de rotação dos discos após o acoplamento? gira livremente em torno de um eixo vertical que passa pelo cenro

com uma velocidade angular de 4,7 rad/s. O momento de inércia

A

do disco em relação ao eixo de rotação é 5,0 X 104 kg · m2• Um

pedaço de massa de modelar de massa 0,020 kg cai verticalmente

e gruda na borda do disco. Qual é a velocidade angular do disco

Barra

imediatamente após a massa cair?

••56

- No salto em distância, o atleta deixa o solo com um

momento angular que tende a girar o corpo para a frente. Essa rotação, caso não seja conolada, impede que o atleta chegue ao solo com a postura correta. O atlea evita que ela ocorra girando os bra

,-

Bloco

ços estendidos para "absorver" o momento angular (Figura 11-18). Figura 11 -53 Problema 60.

Bala

Em 0,700 s, um dos braços descreve 0,500 rev e o ouro descreve

1,000 rev. Trate cada braço como uma barra ina de massa 4,0 kg e • •61 A barra homogênea (de 0,60 m de comprimento e 1,0 kg de comprimento 0,60 m, girando em tono de uma das extremidades.

Qual é o módulo do momento angular toal dos braços do atleta em massa) da Fig. 11-54 gira no plano do papel em tomo de um eixo que passa por uma das extremidades, com um momento de inércia

relação a um eixo de rotação comum, passando pelos ombros, no de O, 12 kg · m2

referencial do atleta?

• Quando a barra passa pela posição mais baixa, colide com uma bola de massa de modelar de 0,20 kg, que ica grudada

••57 Um disco homogêneo de massa 10m e raio 3,0r pode girar na extremidade da barra. Se a velocidade angular da barra imedialivremente como um carossel em torno do cenro ixo . Um disco tamente antes da colisão é 2,4 rad/s, qual é a velocidade angular do homogêneo menor de massa m e raio restá sobre o disco maior, con sistema barra-massa de modelar imediatamente após a colisão?

cênrico com ele. Inicialmente, os dois discs giram juntos com uma

velocidade angular de 20 rad/s. Em seguida, uma pequena perturba

Eixo de rotação

ção faz com que o disco menor deslize para fora em relação ao disco

maior até que sua borda ique presa na borda do disco maior. Depois

Barra

disso, os dois discos passam novamente a girar junts (sem que haja

novos deslizamentos). (a) Qual é a velocidade anular nal do sistema

em relação ao cento do disco maior? (b) Qual é a razão I0 entre a

nova energia cinéica do sistema e a energia cinéica inicial?

••58 Uma plataforma horizonal com a forma de um disco circular

gira sem atrito em tono de um eixo vertical que passa pelo cenro

do disco. A plataforma tem uma massa de 150 kg, um raio de 2,0 Figura 11 -54 Problema 61.

m e um momento de inércia de 300 kg · m2 em relação ao eixo de

rotação. Uma estudante de 60 kg caminha lentamente, a partir da •••62

Um rapezista pretende dar quatro cambalhoas em

borda da plaaforma, em direção ao cenro. Se a velocidade anuum intervalo de tempo .*t* = 1,87 s antes de chegar ao companheiro lar do sistema é 1,5 rad/s quando a estudante está na borda, qual é de número. No primeiro e no último quarto de volta, mantém o cora velocidade angular quando está a 0,50 m de distância do centro? po esticado como na Fig. 11-55, com um momento de inércia 1 =

1

••59 A Fig. 11-52 é uma vista de cima de uma barra ina homogê19,9 kg · m2 em relação ao cenro de massa (o ponto da iura). No nea, de comprimento 0,800 m e massa M, girando horizontalmente resto do salto, mantém o corpo na posição grupada, com um momena 20,0 rad/s, no sentido anti-h orário, em tono de um eixo que pas to de inércia 1 *2* = 3,93 kg · m2• Qual deve ser a velocidade angular sa pelo centro. Uma partícula de massa *M3,00*, inicialmente pre w *2* do trapezista quando está na posição rupada?

sa a uma exremidade da barra, é liberada e assume uma trajetória

perpendicular à posição da barra no instante em que a partícula foi

Posição

liberada. Se a velocidade vP da partícula é 6,00 m/s maior que a ve

grupada

locidade da barra imediaamente após a liberação, qual é o valor de

vP?

Trajetória

\

t

parabólica

do CM

•

Eixo de *J*

Figua 1 1-52 Problema 59.

rotação

)o1

01 (•

••60 Na Fig. 11-53, uma bala de 1,0 g é disparada conra um bloco de 0,50 kg preso à extremidade de uma barra não homogênea de

I1

0,50 kg com 0,60 m de comprimento. O sistema bloco-barra- bala

I1

passa a girar no plano do papel, em tono de um eixo ixo que passa

Início

por *A.* O momento de inércia da barra em relação a esse eixo é 0,060

Fim

kg · m2• Trate o bloco como uma partícula. (a) Qual é o momento de Figura 11 -55 Problema 62.

inércia do sistema bloco-barra- bala em relação ao eixo que passa

pelo ponto *A?* (b) Se a velocidade anular do sistema em relação ao •••63 Na Fig. 11-56, uma criança de 30 kg está em pé na borda eixo que passa por *A* imediatamente após o impacto é 4,5 rad/s, qual de um carrossel estacionário de raio 2,0 m. O momento de inércia é a velocidade da bala imediatamente antes do impacto?

do carrossel em relação ao eixo de rotação é 150 kg · m2• A criança

agarra uma bola de massa 1,0 kg lançada por um colega. Imediata • • •67 A Fig. 11-59 é uma vista de cima de uma barra ina homomente antes de ser agarrada, a bola tem uma velocidade i de módulo gênea de comprimento 0,600 m e massa M girando horizontalmen12 *s que faz um ângulo > = 37º com uma reta tangente à borda te a 80,0 rad*s no sentido antihorário em tomo de um eixo que do car *r*ossel, como mosra a iura. Qual é a velocidade angular do passa pelo cenro . Uma partícula de massa M/3,00, que se move carrossel imediatamene após a criança agar *r*ar a bola?

horizontalmente com uma velocidade de 40,0 *ls,* choca-se com a

1

Figura 1 1-56 Problema 63.

'

1

1

Eixo de [illegible]

yPartícula

•••64

- Ua bailarina começa um *tour jeté* (Fig. 11-19a)

com ua velocidade angular *W;* e um momento angular formado

por duas partes: /

= 1,44 kg · m2 da perna estendida, que faz

rna

um ân

Figura 11-59 Problema 67.

ulo *J* = 90,0° com o corpo, e /,ronco = 0,660 kg · m2 do resto do corpo (principalmente o tronco). Quando esá quase atingindo

a altura máxima, as duas penas fazem um ân

Seção 1 1-12 Precessão de um Giroscópio

ulo *J* = 30° com o

corpo e a velocidade angular é w *1* (Fig. 11-l *9b*). Supondo que /""""º • •68 Um pião gira a 30 revis em torno de um eixo que faz um ânpermanece o mesmo, qual é a valor da razão wjw;?

gulo de 30º com a vertical. A massa do pião é 0,50 kg, o momento

•••65 Duas bolas de 2,00 kg estão presas às extremidades de uma de inércia em relação ao eixo central é 5,0 X 10-4 kg· m2 e o cenro barra ina de 50,0 cm de comprimento e massa desprezível. A bar de massa está a 4,0 cm do ponto de apoio. Se a rotação é no sentido ra está livre para girar sem arito em um plano vertical em tomo de horário quando o pião é visto de cima, qual é (a) velocidade anular um eixo horizontal que passa pelo cento. Com a barra inicialmen da precessão e (b) o sentido da precessão quando o pião é visto de te na horizonal (Fig. 11-57), um pedaço de massa de modelar de cima?

50,0 g cai em uma das bolas, atingindo-a com uma velocidade de ••69 Um certo giroscópio é formado por um disco homogêneo 3,00 /s e aderindo a ela. (a) Qual é a velocidade anular do sis com 50 cm de raio montado no centro de um eixo de 11 cm de tema imediatamente após o chque com a massa de modelar? (b) comprimento e massa desprezível. O eixo está na posição hori

Qual é a razão entre a energia cinética do sistema após o chque e zontal, apoiado em uma das exremidades. Se o disco está girando a energia cinética do pedaço de massa de modelar imediaamente em tomo do eixo a 1000 rev/min, qual é a velocidade angular de antes do chque? (c) De que ângulo o sistema gira antes de parar precessão?

momentaneamente?

Problemas Adicionais

Massade *J* 70 Uma bola maciça homogênea rola suavemente em um piso h o modelar I rizontal e depois começa a subir uma rampa com uma inclinação

Eixo de

+

de 15,0º. A bola para momenaneamente após ter rolado 1,50 m ao

**rotação **

longo da rampa. Qual era a velocidade inicial?

Figura 1 1-57 Problema 65.

u

[illegible]

iO 71 Na Fig. 11-60, uma força horizontal constante F de módulo 12

N é aplicada a um cilindro maciço homogêneo através de uma linha

• • • 66 Na Fig. 1 1-58, um pequeno bloco de 50 g desliza para de pescar enrolada no cilindro. A massa do cilindro é 10 kg, o raio é baixo em uma superfície curva sem atrito a partir de uma altura 0,10 m e o cilindro rola suavemente em uma superfície horizontal.

***h* = 20 cm e depois adere a uma bara homogênea de massa 100 g (a) Qual é o módulo da aceleração do centro de massa do cilindro?**

e comprimento 40 cm. A bar *r*a gira de um ângulo *J* em tono do (b) Qual é o módulo da aceleração angular do cilindro em relação ponto *O* antes de parar momentaneamente. Determine *J*.

ao centro de massa? (c) Em termos dos vetores unitios, qual é a

força de atrito que age sobre o cilindro?

o

•

Linha de

pescar

Figura 11-60 Problema 71.

.. '

' '

72 Um cano de paredes inas rola no chão. Qual é a razão entre a

energia cinéica de translação do cano e a energia cinética de roa

Figura 1 1-58 Problema 66.

ção em relação ao eixo central paralelo à sua maior dimensão?

PARTE 1

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO ANGULAR

73 Um carro de brinquedo de 3,0 kg se move ao longo de um eixo dos vetores unitários, qual é o momento angular do sistema das duas A

***x* com uma velocidade dada por i = -2,0t3i m/s, com tem segun- partículas em relação à origem?**

dos. Para *t* > O, qual é (a) o momento angular *L* do carro e b) o 81 Uma roda homogênea de massa 10,0 kg e raio 0,400 m está torque *T* sobre o carro, ambos calculados em relação à origem? monada rigidamente em um eixo que passa pelo cenro (Fig. 11-62).

Qual é o valor (c) de L e (d) de f em relação ao ponto (2,0 m; 5,0 O raio do eixo é 0,200 m e o momento de inércia do conjunto rodam; O)? Quais é o valor (e) de L e () de f em relação ao ponto (2,0 eixo em relação ao eixo é 0,600 kg · m2• A roda está inicialmente m; -5,0 m; O)?

em repouso no alto de uma supeície que faz um ângulo } = 30,0º

74 Uma roda gira no senido horário em tono do eixo central com com a horizontal; o eixo está apoiado na superície, enquanto a roda um momento angular de 600 kg · m2/s. No instante *t* = O, um torque penera em um sulco aberto na superfície, sem tocá-la. Depois de de módulo 50 N · m é aplicado à roda para inverter a rotação. Em liberado, o eixo rola para baixo, suavemente e sem deslizamento, que insnte t a velocidade angular da roda se anula?

ao longo da superície. Depois que o conjunto roda-eixo desce 2,00

75 Um parquinho possui um pequeno carrossel com 1,20 m de m ao longo da superfície, qual é (a) a energia cinética de rotação e raio e uma massa de 180 kg. O raio de giração do carrossel (veja o (b) a energia cinética de translação do conjunto?

Problema 79 do Capítulo 10) é 91,0 cm. Uma criança com 44,0 kg

de massa corre com uma velocidade de 3,00 m/s em uma rajetória

Roda

tangente à borda do carrossel, inicialmente em repouso, e pula no

carrossel. Despreze o atrito enre os rolamentos e o eixo do carrossel. Calcule (a) o momento de inércia do carrossel em relação ao eixo de roação, (b) o módulo do momento angular da criança em

relação ao eixo de rotação do carrossel e (c) a velocidade angular

do carrossel e da criança após a criança saltar no carrossel.

76 Um bloco homogêneo de granito em forma de livro possui faces de 20 cm por 15 cm e uma espessura de 1,2 cm. A massa espe Figura 11 -62 Problema 81.

cíica (massa por unidade de volume) do granito é 2,64 g/cm3• O

bloco gira em tomo de um eixo perpendicular às faces, siuado à 82 Uma barra homogênea gira em um plano horizontal em tomo de meia distância entre o cenro e um dos cantos. O momento angular um eixo vertical que passa por uma das extremidades. A barra tem em torno desse eixo é 0,104 kg · m2/s. Qual é a energia cinética de 6,00 m de comprimento, pesa 10,0 N e gira a 240 rev/min. Calcule rotação do bloco em tono desse eixo?

(a) o momento de inércia da barra em relação ao eixo de rotação e

77 Duas parículas de massa 2,90 X 10-4 kge velocidade 5,46 m/s (b) o módulo do momento angular em torno desse eixo.

se movem em senidos opostos ao longo de retas paralelas separadas 83 Uma esfera maciça com 36,0 N de peso sobe rolando um plano por uma distância de 4,20 cm. (a) Qual é o módulo *L* do momento inclinado com um ângulo de 30,0º. Na base do plano inclinado, o angular do sistema das duas partículas em relação ao ponto médio cenro de massa da esfera possui uma velocidade de translação de da distância entre as duas reas? (b) O valor de *L* muda se o ponto 4,90 m/s. (a) Qual é a energia cinéica da esfera na base do plano?

em relação ao qual é calculado não está à meia distância entre as (b) Que distância a esfera sobe ao longo do plano? (c) A resposta reas? Se o sentido de movimento de uma das partículas é invertido, do item (b) depende da massa da esfera?

qual é (c) a resposta do item (a) e (d) a resposta do item (b)?

84

Suponha que o ioiô no Problema 17, em vez de rolar a

78 Uma roda de 0,250 m de raio, que esá se movendo inicialmente partir do repouso, é arremessado para baixo com uma velocidade a 43,0 m/s, rola 225 m até parar. Calcule o módulo (a) da acelera inicial de 1,3 m/s. (a) Quanto tempo o ioiô leva para chegar à ex

ção linear e (b) da aceleração angular da roda. (c) Se o momento de tremidade da corda? Nesse instante, qual é o valor (b) da energia inércia da roda em tomo do eixo central é 0,155 kg · m2, calcule o cinética total, (c) da velocidade linear, (d) da energia cinética de módulo do torque em relação ao eixo cenral devido ao arito sobre translação, (e) da velocidade angular e () da energia cinética de a roda.

rotação?

79 As rodas *A* e *B* na Fig. 11-61 são conecadas por uma correia 85 Uma menina de massa *M* está em pé na borda de um carrossel que não desliza. O raio de *B* é 3,00 vezes maior que o de *A*. Qual sem arito de raio *R* e momento de inércia *I* que está parado. A m e

é a razão *l,/18* enre os momentos de inércia das duas rodas se elas nina joga uma pedra de massa *m* horizontalmente em uma dirção têm (a) o mesmo momento angular em relação aos respecivos eixos tangente à borda do carrossel. A velocidade da pedra em relação ao centrais e (b) a mesma energia cinética de rotação?

chão é *v*. Depois disso, qual é (a) a velocidade angular do carrossel

e (b) a velocidade linear da garota?

A

86 No instante *t* = O, o vetor posição de uma partícula de 2,0 kg

A

A

•

em relação à origem é *r* = (4,0 m)i -(2,0 m)j . A velocidade da A

partícula é dada por v = *(-6,0t2* m/s)i para *t* [illegible] em segundos.

Figua 11-61 Problema 79.

Qual é (a) o momento angular L da partícula e (b) o torque f a que

a partícula está submetida, ambos em relação à origem, em termos

dos vetores unitários e para *t* > O? Qual é (c) o valor de *L* e (d) o 80 Uma partícula de 2,50 kg que se move horizontalmente em um valor de f em relação ao ponto (-2,0 m; -3,0 m; O) para *t* > O?

A

piso com velocidade (-3,00 m/s)j sofre uma colisão perfeiamente 87 Se as calotas polares de gelo da Terra derretessem totalmente e inelásica com uma parícula de 4,00 kg que se move

a água voltasse para os oceanos, estes icariam cerca de 30 m mais

A

hoizontalmen-

te no mesmo piso com velocidade (4,50 m/s)i. A colisão ocorre nas profundos. Que efeito isso teria sobre a rotação da Terra? Faça uma coordenadas (-0,500 m, -0,100 m). Após a colisão e em termos estimativa de qual seria a variação da duração do dia.

88 Um avião de 1200 kg está voando em uma nha reta a 80 m/s, 91 Uma pequena esfera maciça com 0,25 cm de raio e uma massa 1,3 km acima do solo. Qual é o módulo do momento angular do de 0,56 g rola sem deslizar no interior de um grande hemisfério ixo avião em relação a um ponto no solo verticalmente abaixo do local com 15 cm de raio e um eixo de simetria vertical. A esfera parte do onde se encontra?

repouso no alto do hemisfério. (a) Qual é a energia cinética da esfe89 Com eixo e raios de massa desprezível e um aro ino, uma certa ra ao chegar ao ponto mais baixo do hemisério? (b) Que fração da roda de bicicleta tem um raio de 0,350 m, pesa 37,0 N e pode girar energia cinética da esfera no ponto mais baixo do hemisfério está em tono do eixo com atrito desprezível. Um homem segura a roda associada à roação em tono de um eixo que passa pelo centro de acima da cabeça com uma das mãos, com o eixo na posição verti massa? (c) Qual é o módulo da força normal que a esfera exerce socal, enquanto está sentado em um banco que pode girar sem ari bre o hemisfério no instante em que chega ao ponto mais baixo?

to; a roda gira no sentido horário, quando vista de cima, com uma 92 Um automóvel com 1700 kg de massa acelera do repouso até velocidade angular de 57,7 rad/s, e o banco esá inicialmente em 40 km/h em 10 s. Supondo que as rodas são discos homogêneos de repouso. O momento de inércia do sistema *roda* + *homem* + *ban* 32 kg, determine, no nal do intervalo de 10 s, (a) a energia cinética

***co* em relação ao eixo de rotação comum é 2,10 kg · m2• O homem de rotação de cada roda em torno do respectivo eixo, (b) a energia usa a mão livre para interromper bruscamente a rotação da roda (em cinética de cada roda e (c) a energia cinéica total do automóvel.**

relação ao banco). Determine (a) a velocidade angular resultante e 93 Um corpo de raio *R* e massa *m* rola suavemente com velocidade (b) o sentido de rotação do sistema.

v em uma superfície horizontal e depois sobe uma colina até uma

90 Para uma pessoa de 84 kg que se encontra no equador, qual é altura máxima *h*. (a) Se *h* = 3v2/4g, qual é o momento de inércia o módulo do seu momento angular em relação ao centro da Terra do corpo em relação ao eixo de rotação que passa pelo centro de devido à rotação da Terra?

massa? (b) Que corpo pode ser esse?

APÊNDICE A

O Sistema Internacional de

Unidades SI *

Tabela 1

As Unidades Fundamentais do SI

Grandeza

Nome

Símbolo

Deinição

comprimento

metro

m

" ... a distância percorrida pela luz no vácuo em 1/299.792.458 de

segundo." (1983)

massa

quilograma

kg

" ... este protótipo [um certo cilindro de platin a -irídio] será

considerado daqui em diante como a unidade de massa." (1889)

tempo

segundo

s

" ... a duração de 9 .192. 631. 770 períodos da radiação

correspondente à ransição enre os dois níveis hipenos do

estado fundamental do átomo de césio-133." (1967)

corrente elérica

ampere

A

" ... a corrente constante, que, se mantida em dois condutores

paralelos retos de comprimento ininito, de seção transversal

circular desprezível e separados por um distância de 1 m no

vácuo, produziria entre estes condutores uma força igual a 2 x

10-7 newton por mero de comprimento." (1946)

temperatura termodinâmica

kelvin

K

" ... a fração 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto

triplo da água." (1967)

quantidade de matéria

mol

mol

" ... a quanidade de matéria de um sistema que contém um

número de enidades elementares igual ao número de átomos que

existem em 0,012 quilograma de carbono-12." (1971)

intensidade luminosa

candela

cd

" ... a intensidade luminosa, em uma dada direção, de uma fonte

que emite radiação monocromática de frequência 540 x 102 hertz

e que irradia nesta direção com uma intensidade de 1/683 watt

por esferoradiano." (1979)

*** Adaptado de "Toe Intenaional System of Units (SI)", Publicação Especial 330 do National Bureau of Standards, edição de 2008. As deinições aqui descritas foram adotadas pela Conferência Nacional de Pesos e Medidas, um órgão intenacional, nas datas indicadas. A candeia não é usada neste livro.**

Tabela 2

Algumas Unidades Secundárias do SI

Grandeza

Nome da Unidade

Símbolo

'

area

mero quadrado

m2

volume

mero cúbico

'

nr'

frequência

hertz

Hz

s-1

massa especíica

quilograma por mero cúbico

k/m'

velocidade escalar, velocidade

mero por segundo

m/s

velocidade angular

radiano por segundo

rad/s

aceleração

mero por segundo ao quadrado

m/s2

aceleração angular

radiano por segundo ao quadrado

rad/s2

força

newton

N

kg· m/s2

pressão

pascal

Pa

N/n12

rabalho, energia, quantidade de calor

joule

J

1' · m

potência

watt

w

J/s

quantidade de carga elérica

coulomb

e

A · s

diferença de potencial, força eletromotriz

volt

V

W/A

intensidade de campo elétrico

volt por mero (ou newton por coulomb)

V/m

N/C

resistência elétrica

ohm

a

V/A

capacitância

farad

F

A ·sN

luxo magnético

weber

Wb

V ·s

indutância

henry

I-1

V ·s/A

densidade de luxo magnético

tesla

1'

Wb/m2

intensidade de campo magnéico

ampere por metro

A/n1

entropia

joule por kelvin

J/1(

calor específico

joule por quilograma-kelvin

0.050

Constante de Boltzmann

k

1,38 X 10-1• J/K

1 J806504

1, 7

Constante de Stefan-B o ltzmann

u

5,67 < 10-M W/m1· K4

5,67040

7,0

Volume molar de um gás ideal nas CNTP<

vm

2,27 X 10-1 m3/mol

2,271 098 1

1,7

Constante elérica

f;J

8,85 X 10-12 P/m

8,854 187 817 62

exata

Constante manética

;J

1,26 *X* [illegible] H/n1

1 .256 637 6143

exala

Constante de Planck

h

6.63 X 10-w J · s

0.025

Massa do nêuron4

n10

1.68 X 10-27 kg

1 ,674 927 211

0,050

Massa do múon

m

1 88

'

X 10-21 ko

'

o

1 ,883 531 30

0,056

Momento magnético do elétron

llc

9.28 X 10-1. 4 J/T

9.284 763 77

a

5,29 X 10-11 m

5,291 772 085 9

6,8 X 1 0-4

Constante de Rydberg

R

1.10 X 107 m-.

l,097373 1568527

6,6 X 10-6

Comprimento de onda de Compton do eléron

Àç

2,43 X 10-12 m

2,426 310217 5

0,0014

•os valores desta coluna têm a mesma unidade e potência de I O que o valor pático.

"Partes por milhão.

'CNTP signiica condições normais de temperaura e pressão: OºC e 1,0 am (0,1 Pa).

dAs massas dadas em u estão em unidades uniicadas de massa atômica: J u sx 1,660 538 782 x 10-21 kg.

***Os valores desta tabela foram selecionados entre os valores recomendados pelo CODATA em 2006 (w.physics.nist.gov).**

A P [illegible] N D ICE C

Alguns Dados Astronômicos

Algumas Distâncias da Tera

'

27.3 d

Potência de radiaçãoc

w

3,90 X 1026

"Medido em relação às estrelas distantes.

"O Sol, uma bola de gás, não gira como um corpo rígido.

,·Perto dos limites da atmosfera terrestre, a energia solar é recebida a uma tca de 1340 W/m2, supondo uma incidência normal.

Algumas Propriedades dos Planetas

Mercúrio Vênus Terra

Marte Júpiter

Satuno

Urano

Netuno

Plutão*

Disância média do Sol,

106 m

57,9

108

150

228

778

1430

2870

4500

5900

Período de revolução, anos

0,241

0,615

1,00

l ,8

1 1 9

'

29.5

84,0

165

248

Período de rotação[a], dias

58.7

- 243h 0,97

1,03

2.100

Massa Terra = 1)

0,0558

0,815

1,00

0,107

318

95,1

14,5

17,2

0,02

Densidade (água = 1)

5,60

5,20

5,52

3,95

1,31

0,74

1 ,21

1,3

Satélies conhecidos

o

o

1

2

63 + anéis 60 + anéis 27 + anéis 13 + anéis 3

•Medido em relação às estrelas distantes.

•Vênus e Urano giram no sentido contrário ao do movimento orbital.

'Aceleração gravitacional medida no quador do planeta.

***Desde 2008, por dcisão da União Astronômica Intenacional, Pluão não é mais um planeta e sim um plutoide, uma nova classe de astro que, até o momento, tem apenas dois representantes: Plutão e Eris. (N.T.)**

A-322

APÊNDICE D

Fatores de Conversão

Os fatores de conversão podem ser lidos diretamente destas tabelas. Assim, por

exemplo, 1 grau = 2,778 X 10-3 revoluções e, portanto, 16,7° = 16,7 X 2,778 X

10-3 revolução. As unidades do SI estão em leras maiúsculas. Adaptado parcialmente de G. Shortley and D. Williams, *Elements of Physics*, 1971, Prentice-Hall, Englewood Clifs, NJ.

Agulo Plano

o

1

i

RADNOS

rev

1 grau = 1

60

3600

1 ,745 X 1 o -.

APÊNDICE D

Volume

ETROS3

cm3

L

pés3

polegadas3

1 ETRO CBICO = 1

10°

100

1,639 *X* 10-2

**5.787 *X* 1 [illegible]

1 galão americano = 4 quartos de galão ameicano = 8 quartilhos americanos = 128 onças luidas americanas = 231 polegadas3

1 galão impeial britânico = 277,4 polegadas3 = 1,201 galão ameicano

Massa

As grandezas nas áreas sombreadas não são unidades de massa, mas são frequentemente usadas como l. Assim, por exemplo, quando escrevemos 1 kg "=" 2,205 lb, isso signiica que um quilograma é a *massa* que *pesa* 2,205 libras em um local onde *g* tem o valor padrão de 9,80665 m/s2•

g

QULOGRAMAS slugs

u

onças

libras

toneladas

1 rama = 1

0,001

6 852 X 1 0 -5

'

6 022

0.4536

3,108 *X* 10 2 2,732 X 102' 16

1

0,0005

1 tonelada = 9,072 X 105

32.17

1,862 *X* 10-2

1 QUILOGRAMA por

ETR03 = 1,940 x 10 ·1

l

0,001

6,243 X 10 .

3,613 X 10 *5*

1 grama por centmetro3 = 1,940

1000

1

62,43

1

2,237

10

1 milha por hora = 1 ,467

1,609

0,4470

44.70

1 centímetro por segundo = 3,281 X 10-2

3,6 X 10-2

0,01

2,237 X 10-z

1

1 nó = 1 milha marítima/h = 1 ,688 pés/s

1 milha/min = 88,00 pés/s = 60,00 milhas/h

Foça

As unidades de força nas reas sombreadas são atualmente pouco usadas. 1 grama-força (= 1 g) é a força da gravidade gue atua sobre um objeto cuja massa é 1 grama em um local onde *g* possui o valor padrão de 9,80665 m/s2.

dinas

NEWTONS

libras

poundals

gf

kgf

l dina = 1

10 ;

453.6

0,4536

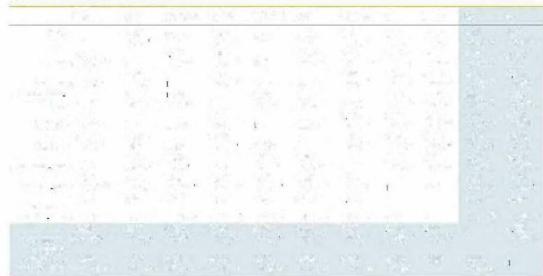
1 poundal = 1,383 x t O'I

0,1383

**3,108 X [illegible]

1

10^{-4}
1
10^{-7}

10^{-8}
1

APÊNDICE D

Energia, Trabalho e Calor

As randezas nas áreas sombreadas não são unidades de energia, mas foram incluídas por conveniência. Elas se originam da fórmula relaivística de equivalência entre massa e energia *E* = mc2 e representam a energia equivalente a um quilograma ou uma unidade unificada de massa atômica (u) (as duas úlimas linhas) e a massa equivalente a uma unidade de energia (as duas colunas da exremidade direita).

Btu

erg

pés-libras hp . h

JOULES cal

kW · h

eV

Me V

kg

u

1 Btu =

l.055

777,9

3.929

1055

1.174

7.070

1

252,0

2.930

b.585

6.585

X 1Q1 l

X 10 •

X 10 4

X 1021

X 10"

X 10 14

X 1012

9 481

'

7,376

3.725

2.389

2.778

6.242

6.242

1.113

670,2

1 erg = X 10 11

l

X 10 "

X t O 14

1 o 1

X 1 0 8

X 10 14

X 1011

X 10'

X 10 2'

1,285

1.356

5.051

J.766

8.4

8.44

1.5)

9.037

1 pé-libra= X 10 ;

X 107

X 10 7

l,356

OJ238

X 10 7

**X [illegible]

X 1012

X 10 ll

X 10v

1 horsepower-

2,685

1.,9S0

2,685

6.413

1,676

1,676

2,988

1.799

hora = 2545

X **'IIJ'3**

X **10"**

1

X 10•

X **105**

0,7457

X 102.<

X 101"

X **IU 11**

X 1011'

9,481

3,725

2.778

6,242

6.242

l .l IJ

6.702

1 JOULE = X 10 •

101

0,7376

X 10 7

U,2389

X 10 7

**X [illegible]

X f)IJ

***X* 10 11**

X 10' 1

3.968

4.1868

1,560

l, 163

2.613

2.613

4.60

2,80(,

1 caloria = X I O)

X 107

3,088

X 1() 1'

4,1868

1

X 10 •

X 101"

X 1011

X 10 11

X 1011

3,600

2.655

3.600

8.600

2,247

2.247

4.(07

2.413

1 quilowatt-hora = 3413

X 1().'

X 10"

1,.\41

X 10"

X 10'

1

X 102'

X 101'

(10 li

(101"

1,519

1,602

1.182

5.967

J ,(,02

3.827

4.450

1.73

1,074

1 eléron-volt = X 10 17

X 10 12

X 10 i•J

X 10 *1"*

X] 0 t•J

X 10 z,,

X 10 '•

10 °

x 10 [illegible]

x 10 ')

1il9

l.602

1,182

5,967

1.602

3.827

4,450

8.987

2.146

2.497

5.610

5.610

1

maxwell

WEBERS

1 gauss = 1

10

1 maxwell = 1

1 TESLA = 104

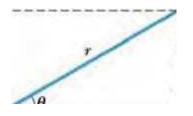
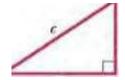
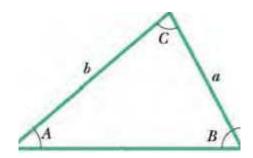
107

1 WEOER - lOK

1 mi)igauss = 0,001

1

l tesla = l weber/mero2

APÊNDICE E

Fórmulas Matemáticas

Geomeria

> maior que (>> muito maior que)

Círculo de raio r: circunferência = *2rr;* área = *r2.*

< menor que (<< muito menor que)

Esfera de raio *r:* área = 41rr; volume = ; *rr3*

> maior ou igual a (não menor que)

Cilindro circular reto de raio *r* e altura h: área = *2rr + 2rrh;* < menor ou igual a (não maior que) volume = *1rrh.*

+ mais ou menos

Triângulo de base *a* e altura h: área = *fah.*

c proporcional a

r somatório de

Fórmula de Báskara

Xméd valor médio de *x*

[illegible] -4ac***

Seax2 + bx + e = O , x=-

-- - -

2a

Identidades Trigonométricas

Funções Tigonométicas do Angulo 8

sen(90º -)) = cos 8

cos(90º - 8) = sen 8

scn 8

X

= _ cos 8 = - eixo y

r

sen 0/cos *(í* = tan O

$$\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

1.

= 1

1L:

4. *J*

***x*,,, 1**

d

du

x,,, dx = --- (ni * -1)

ni +

2.

l

L ***(au) = á***

5. J

***1* r**

d.t

dx

d

du

dv

x = ln lxl

J. dx (u + v) = dx + dx

J

J

d

6. u [illegible] dx : uv - v [illegible] dx

4.

x"' = 111x"'- ***1***

dx

J

d

J

7. er dx

5.

ln

= ex

***X* = -**

dx

X

J

d

tf,,

d11

6.

(u11) = 1 - + v

8. sen x dx = -cos x

tlx

clt

1

***I* x**

J

d

7.

ex = ***e'***

9. cos x dx = sen x

dx

d

J

11.

•

J

d C>l ***X*** **= -csc-x·**

xe-ax

X

15.

x"e-ar *x* = --

d

du

o

a••+ I

14. -e'' = <," -

l'

dx

d:r

16.

x2ne-a.,1 dx

5 ·

2

1T

= _1

.

3_

· ··_(._n_—

_l-'-) [illegible] r;

n

d

du

o

2"+ 1a

a

J;

15. _, sen *u* = cos *u* L:

J

LC

(X

dx

18.

x dx

1

(xi + 02)312

(x2 + a2)112

***J* dx**

X

19. (x2 + 02)312 n2(x2 + 02) 112

Lx

20.

n!

x2n+I *e-11x2* x =

***(a* > O)**

***a"* I· I**

J xdx

21. *X* + d = *X* - d *ln(X* + d)

APÊNDICE F

Propriedades dos Elementos

Todas as propriedades ísicas são dadas para uma pressão de 1 atm a menos que seja indicado em conrário.

Calor

Número

Massa

Massa

Ponto de

Especíico,

Atômico,

Molar,

Específica,

Ponto de

Ebulição,

J/(g . ºC)

Elemento

Símbolo

z

g/mol

g/cm3 a 20ºC

Fusão, ºC

1560

O, 122

Bóhrio

Bh

107

262,12

Boro

B

5

10,811

2,34

2030

1,11

Bromo

Br

35

79,909

3, 12 (líquido)

-7.2

58

0,293

Cádmio

Cd

48

'112,40

8,65

321,03

765

0,226

Cálcio

Ca

20

40.08

1,55

838

1440

0,624

Califómio

Cf

98

(251)

Carbono

e

6

12,01115

2,26

3727

4830

0,691

Cério

Ce

1725

0,129

Cloro

CI

17

35,453

3,214 X 1 0 -3 (OºC)

-101

-34 7

'

0,486

Cobalto

Co

27

58,9332

8,85

1495

2900

0.423

Cobre

Cu

29

63,54

8,96

1083,40

2595

0,385

Copeício

Cp

112

(285)

Ciptônio

r

36

83,80

3 488 X 10-3

'

151,96

5,243

817

1490

0,163

Férmio

Fm

100

(237)

A-330

824

0,155

0,155

,

!trio

y

39

88,905

4,469

1526

3030

0,297

Lanânio

La

57

138,91

6,189

920

3470

0,195

Laurêncio

Lr

103

(2597)

Lítio

Li

3

6,939

0,534

180,55

1300

3,58

Lutécio

Lu

7

174,97

9,849

1663

1930

0.155

Magnésio

Mg

12

101

(256)

Mercúrio

Hg

80

200.59

1 3,55

8,57

2468

4927

0,264

Nquel

I

28

58,71

8,902

1453

2730

0,444

Nitrogênio

Os

76

190,2

16.4

12,02

1552

3980

0,243

Platina

PI

78

195.09

21 .45

1769

4530

0,134

Plutônio

Pu

94

{244)

19.8

640

3235

0,130

Polônio

Po

84

(210)

9.32

254

Potássio

K

1 9

39.102

0.862

63.20

760

0,758

Praseodímio

Pr

59

140,907

6.773

931

3020

0,197

Prata

Ag

47

107,870

10,49

960,8

2210

0,234

Promécio

Pn1

61

{145)

7.22

(127)

Protactnio

Pa

91

(231)

15,37 (estimada) (1230)

Rádio

Ra

88

(226)

5,0

700

102,905

12,41

1963

4500

0,243

Roentgênío

Rg

111

(280)

Rubídio

Rb

37

85.47

1,532

39,49

688

0,364

Rutênio

Ru

44

101.107

12,37

2250

4900

0,239

Rutherfórdio

Rf

104

261.11

Samário

Sm

62

150,35

7,52

1072

1630

0,197

Seabórgio

Sg

16

263,118

Selênío

Se

34

78,96

4,79

221

85

0,318

Silício

Si

14

28,086

2,33

1412

2680

0.712

Sódio

Na

11

2,9898

0,9712

97,85

892

1,23

Tálio

Tl

81

204,37

11,85

304

1457

0,130

Tânalo

'!;1

180.948

'180,948

16,6

5425

0,138

Tecnécio

1';

43

(99)

(99)

11,46

0,209

Telúrio

Te

52

127,60

127,60

6,24

990

91,22

6,506

1852

3580

0,276

Os números enre parênteses na coluna das massas molares são os números de massa dos isótopos de vida mais longa dos elementos radioativos. Os pontos de usão e pontos de ebulição entre parênteses são pouco coniáveis.

Os dados para os gases são válidos apenas quando estes se encontram no estado molecular mais comum, como H2, He, 02, Ne *etc.* Os calores especíicos dos gases são os valores à pressão constante.

***Fonte:* Adaptada de J. Emsley, *The Elements,* 3' edição, 1998. Clarendon Press, Oford. Veja tamém www.webelements.com para valores atualizados e, possivelmente, novos elementos.**

N˜

Tabela Periódica dos Elementos

D D [illegible]

Metais

Gases

alcalinos

D Metaloides

nobres

IA

o

ao 1ne.as

2

l

H

He

!IA

IIIA *NA*

VA A IIA

3

4

5

6

7

8

9

10

2

i Be

B e N o F Ne

Metais de transição

11

12

13

14

15

16

17

18

Na Mg

IIl3

I Si p s CI r

[illegible] 3

o

IIIB 3 l3 Vl3 VIl3 ,

. 13

113

N

19

20

21

22

23

24

25

26

27

97

98

99

100 101 102 103

Série dos aetinídeos t Ac Th Pa U Np Pu m Cm Bk Cf Es Fm Md No r Os elementos 113 a 118 foram descobertos mas, até 2010, ainda não haviam recebido no1nes. Veja www.webelements.com para informaçes atualizadas e possíveis novos elemenos.

RESPOSTAS

dos Testes e das Perguntas e

Problemas Ímpares

CAPÍTULO 1

com a extremidade da primeira; ã deve ligar a origem da primeira

PR 1. (a) 4,00 X 104 m; (b) 5,10 X 108m2; (c) 1,08 X 1012 km3 componente com a exremidade da segunda) 3. ça) +, + ;(b) +, -; 3. (a) 109 *,m;* (b) 10-4; (c) 9,1 X 105 *,m* 5. (a) 160 varas; (b) 40 (c) +, + (o vetor deve ser traçado da origem de d1 à extremidade de cadeias 7. 1,1 X 103 acres-pés 9. 1,9 X 1022 cm3 11. (a) 1,43; (b) d2) 4. (a) 90º; (b) Oº (os vetores são paralelos); (c) 180º (os vetores 0,864 13. (a) 495 s; (b) 141 s; (c) 198 s; (d)-245 s 15. 1,21 X 1012 são antiparalelos) 5. (a) Oº ou 180º; (b) 90º

***,s* 17. C, D, A, B, E; o critério importante é a constância dos re P 1. sim, se os vetores forem paralelos 3. A sequência J ,i 2**

ou

sultados e não o seu valor 19. 5,2 X 106 m 21. 9,0 X 1049 átomos a sequência *d2,d2,d3•* 5. todos, menos (e) 7. (a) sim; (b) sim; (c) 23. (a) 1 X 103 kg; (b) 158 kg/s 25. 1,9 X 105 kg 27. (a) 1,18 X não 9. (a) +*x* para (1), +*z* para (2), +*z* para (3); (b) -*x* para (1), 10-29 m3; (b) 0,282 nm 29. 1750 kg 31. 1,43 kg/min 33. (a) 293 -*z* para (2), -*z* para (3) alqueires americanos; (b) 3,81 X 103 alqueires americanos 35. (a) PR 1. (a) -2,5 m; (b) -6,9 m 3. (a) 47,2 m; (b) 122º 5. (a) 156

22 pecks; (b) *5,5* imperial bushels; (c) 200 L 37. 8 X 102km 39. km; b) 39,8º a oeste do norte 7. (a) 6,42 m; (b) não; (c) sim; (d) (a) 18,8 galões; (b) 22,5 galões 41. 0,3 cord 43. 3,8 mg/s 45. (a)

•

•

sim; (e) uma possível resposta: (4,30 m)i + (3,70 m)j + (3,00 m)

sim; (b) 8,6 segundos do universo 47. 0,12 UA/min 49. (a) 3,88; *k;* ()7,96 m 9. (a) (3,0 m)i - (2,0 m)} + (5,0 m)k; b) (5,0 m)i -

(b) 7,65; (c) 156 ken3; (d) 1,19 X 103m3 51. (a) 3,9 m, 4,8 m; (b) (4,0 m)1 - (3,0 m)k; (c) (-5,0 m)i + (4,0 m)} + (3,0 m)k 11. (a) 3,9 X 103 mm, 4,8 X 103 mm; (c) 2,2 m3, 4,2 m3 53. (a) 4,9 X 10-6 (-9,0 [illegible] + (10 m)}; (b) 13 m; (c) 132º 13. 4.74 m 15. (a) 1,59

parsecs; (b) 1,6 X 1 0 -5 anos-luz

m; (b) 12,1 m; (c) 12,2 m; (d) 82,5º 17. (a) 38 m; (b)-37,5º; (c)

CAPÍTUL02

130 m; (d) 1,2º; (e) 62 m; () 130º 19. (a) 5,39 m; b) 21,8º à es

T 1. b e c 2. (veriique a derivada

querda 21. (a)-70,0 cm; (b) 80,0 cm; (c) 141 cm; (d) -172º 23.

***d/dt)* (a)l e 4; (b)2 e 3 3. (a)**

positivo; (b) negativo; (c) negativo; (d) positivo 4. 1 e 4 *(a= d2!dt2* 3,2 25. 2,6 km 27. (a) 8i + 16}; (b) 2i + 4} 29. (a) 7,5 cm; (b) deve ser constante) 5. (a) positivo (deslocamento para cima ao lon 90º; (c) 8,6 cm; (d) 48º 31. (a) ai + a} + ak; (b) -ai + *a}* + ak; go do eixo y); (b) negativo (deslocamento para baixo ao longo do (c) ai - *a]* + *ak;* (d) -ai - *a]* + ak; (e) 54,7º; () 3º·5a 33. (a) 12; eixo y); (c) *a* = *-g* =-9,8 /s2

(b) +z; (c) 12; (d) -z; (e) 12; () +z 35. (a) -18,8 unidades; (b)

•

•

26,9 unidades, na direção +z 37. (a)-21; (b) -9 ;(c) Si - llj

P 1. (a) negaivo; (b) positivo; (c) sim; (d) positiva; (e) constante - 9k 39. 70,5º 41. 22º 43. (a) 3,00 m; (b) O; (c) 3,46 m; (d) 2,00

3. (a) todas iguais; (b) 4, 1 e 2 empatados e depois 3 5. (a) positi m; (e) -5,00 m; () 8,66 m; (g) -6,67; (h) 4,33 45. (a) -83,4; b) vo; (b) negativo; (c) 3 e 5; (d) 2 e 6 empaados, depois 3 e 5 empa (1,14 X 103)k; (c) 1,14 X 103, ***8*** **não é definido, , = Oº; (d) 90,0º; tados, e depois 1 e 4 empatados (zero) 7. (a)** ***D;*** **(b)** ***E*** **9. (a) 3,2,1; (e) -5,14i + 6,13j + 3,00k; () 8,54,** ***8*** **= 130º, , = 69,4º 47. (a) (b) 1,2,3; (c) todas iguais; (d) 1,2,3**

140º; (b) 90,0º; (c) 99,1 º 49. (a) 103 km; (b) 60,9º ao nore do oeste

PR 1. 13 m 3. (a) +40 km/h; (b) 40 km/h 5. (a) O; (b) -2 m; (c) O; 51. (a) 27,8 m; (b) 13,4 m 53. (a) 30; (b) 52 55. (a) -2,83 m; (b) (d) 12 m; (e) + 12 m; () +7 ***s 7. 60 km 9. 1,4 m 11. 128 m*****h -2,83 m; (c) 5,00 m; (d) O; (e) 3,00 m; () 5,20 m; (g) 5,17 m; (h) 13. (a) 73 km/h; (b) 68 m/h; (c) 70 km/h; (d) O 15. (a) -6** ***s; (b) 2,37 m; (i) 5,69 m; j) 25º ao norte do leste; (k) 5,69 m; (1) 25º ao no sentido negativo; (c) 6*** **s; (d) diminuindo; (e) 2 s; () não 17. sul do oeste 57. 4,1 59. (a) (9,19 m)i' + (7,71 m)}'; (b) (14,0 m) (a) 28,5 c/s; (b) 18,0 c/s; (c) 40,5 c/s; (d) 28,1 c/s; (e) 30,3 i' + (3,41 m)]' 61. (a) l li + 5,0} - [illegible] (b) 120º;,(c) -4,9; (d2**

c/s 19. -20 ***s2 21. (a) 1,10*** **s; (b) 6,1 1** ***s; (c) 1,47*** **s; 7,3 63. (a) 3,0 m2; (b) 52 m3; (c) (11 m2)i + (9,0 m2)j + (3,0 m2)k (d) 6,11** ***s2 23. 1,62 X 1015*** **s2 25. (a) 30 s; (b) 300 m 27. (a) 65. (a) (-40i - 20} + 25k) m; (b) 45 m**

+ 1,6 ***s; (b) + 18*** **s 29. (a) 10,6 m; (b) 41,5 s 31. (a) 3,1 X 106**

s; (b) 4,6 X 1013m 33. (a) 3,56 ***s2, (b) 8,43*** **s 35. 0,90 /s2 37. CAPÍTULO 4**

(a) 4,0 /s2; (b) positivo 39. (a)-2,5/s2; (b) l; (d) O; (e) 2 41. 40 T 1. (trace v tangente à trajetória, com a origem na trajetória) (a) m 43. 0,994 *s2 45. (a) 31* s; (b) 6,4 s 47. (a) 29,4 m; (b) 2,45 primeiro; (b) terceiro 2. (calcule a derivada segunda em relação ao s 49. (a) 5,4 s; (b) 41 *s 51. (a) 20 m; (b) 59 m 53. 4,0* s 55. tempo) (1) e (3) *a*

(a) 857 *s2; (b) para cima 57. (a) 1,26 X 103* s2

***x e aY* são constantes e, portanto, ã é constante;**

; b) para cima (2) e (4) *a,é* constante, mas *a*

59. (a) 89 cm; (b) 22 cm 61. 20,4 m 63. 2,34 m 65. (a) 2,25 /s;

***x* não é constante e, portanto, *ã* não é**

consante 3. sim 4. (a) *v,* é constante; (b) *vyé* inicialmente positiva,

(b) 3,90 /s 67. 0,56 /s 69. 100 m 71. (a) 2,00 s; (b) 12 cm; (c) diminui até zero e depois se torna cada vez mais negativa; (c) *a,* =

-9,00 c/s2; (d) para a direita; (e) para a esquerda; () 3,46 s 73.

•

•

O sempre; (d) *a, = -g* sempre 5. (a) -(4 *s)i; (b) -(8* s2)j

(a) 82 m; (b) 19 *s 75. (a) 0,74 s; (b) 6,2* s2 77. (a) 3,1 /s2;

(b) 45 m; (c) 13 s 79. 17 /s 81. +47 /s 83. (a) 1,23 cm; (b) por P 1. *a* e *b* empatados, *b* 3. diminui 5. *a, b, e* 7. (a) O; (b) 350 km/h; 4;(c)por9; (d)por 16; (e)por25 85.25 ./h 87.1,2h89.4H 91. (c) 350 km/h; (d) igual (a componente verical do movimento seria (a) 3,2 s; (b) 1,3 s 93. (a) 8,85 *s; (b) 1,00 m 95. (a) 2,0* s2

a mesma) 9. (a) todas iguais; (b) todas iguais; (c) 3,2,1; (d) 3,2,1

; (b)

12 *s; (c) 45 m 7. (a) 48,5* s; (b)4,95 s; (c)34,3 *s; (d)3,50 s 11. 2, 1 e 4 empatados, 3 13. (a) sim; b) não; (c) sim 99. 22,0* s 101. (a) *v* = (v5 + [illegible] (b) *t* = [(v5 + 2gh)º·5 - *v*

PR 1. (a) 6,2 m 3. (-2,0 m)i + (6,0 m)} -(10 m)k 5. (a) 7,59

0V,

(c) igual a (a); (d) *t* = [(v5 + 2gh)º5 + v0] / *g*, maior que (b).

km/h; (b) 22,5º a leste do norte 7. (-0,70 *s)i* + *(1,4* s)} -

(0,40 *s)k 9. (a) 0,83 c*s; b) Oº; (c) 0,11 /s; (d) -63º 11. (a)

CAPÍTUL03

(6,00 m)i - (106 m)}; (b) (19,0 /s)i - (224 *s)}; (c) (24,0* s2)i

**T 1. (a) 7 m *(ã* e *E* no mesmo sentido); (b) l m *(ã* e *E* em sentidos - (336 *s2)}; (d) -85,2º 13. [illegible] s2)t} + (1 /s)k; (b) (8 [illegible]

opostos) 2. *e, d,f* (a origem da segunda componente deve coincidir 15. (a) (-1,50 /s)}; b) (4,50 m)i - (2,25 m)} 17. (32 /s)i 19.

(a) (72,0 m)i + (90,7 m)]; (b) 49,5º 21. (a) 18 cm; (b) 1,9 m 23. N 49. (a)2,18/s2; b) 116N; (c) 21,0/s2 51.(a)3,6/s2; (b) 17

(a) 3,03 s; b) 758 m; (c) 29,7 *s 25. 43,1* s (155 kmh) 27. (a) N 53. (a) 0,970 *s2; (b) l 1,6 N; (c) 34,9 N 55. (a) 1,1 N 57. (a) 10,0 s; (b) 897 m 29. 78,5º 31. 3,35 m 33. (a) 202* s; (b) 806 m; 0,735 *s2; (b) para baixo; (c) 20,8 N 59. (a) 4,9* s2; (b) 2,0 *s2; (c) 161* s; (d) -171 /s 35. 4,84 cm 37. (a) 1,60 m; (b) 6,86 m; (c) para cima; (d) 120 N 61. *Mal(a+g)* 63. (a) 8,0 /s; (b) +*x* (c) 2,86 m 39. (a) 32,3 m; (b) 21,9 *s; (c) 40,4º; (d) abaixo 41. 65. (a) 0,653* s3; (b) 0,896 /s3; (c) 6,50 s 67. 81,7 N 69. 2,4 N

55,5º 43. (a) 11 m; b) 23 m; (c) 17 /s; (d) 63º 45. (a) na rampa; 71. 16 N 73. (a) 2,6 N; (b) 17º 75. (a) O; (b) 0,83 /s2; (c) O 77.

(b) 5,82 m; (c) 31,0º 47. (a) sim; (b) 2,56 m 49. (a) 31 º; (b) 63º 51. (a) 0,74 /s2; (b) 7,3 *s2 79. (a) 1 1 N; (b) 2,2 kg; (c) O; (d) 2,2 kg (a) 2,3º; (b) 1,4 m; (c) 18º 53. (a) 75,0 m; (b) 31,9* s; (c) 66,9º; 81. 195 N 83. (a) 4,6 *s2; (b) 2,6* s2 85. (a) a corda arrebenta; (d) 25,5 m 53. no terceiro 57. (a) 7,32 m; b) para oeste; (c) para (b) 1,6 /s2 87. (a) 65 N; (b) 49 N 89. (a) 4,6 X 103 N; (b) 5,8 X

o norte 59. (a) 12 s; (b) 4,1 /s2; (c) para baixo; (d) 4,1 *s2; (e) 103 N 91. (a) 1,8 X 102N; (b) 6,4 X 102N 93. (a) 44 N; (b) 78 N; para cima 61. (a) 1,3 X 105*s; (b) 7,9 X 105/s2; (c) aumentam (c) 54 N; (d) 152 N 95. (a) 4 kg; (b) 6,5 /s2; (c) 13 N

63. 2,92 m 65. (3,00 /s2)i +(6,00 *s2)j 67. 160* s2 69. (a) 13 CAPÍTULO 6

***s2; (b) para leste; (c) 13* s2; (d) para leste 71. 1,67 73. (a) (80**

h)i - (60 km/h)}; (b) Oº; (c) não 75. 32 /s 77. 60º 79. (a) 38 T 1. (a) zero (porque não há uma tenativa de deslizamento); (b) *5*

nós; (b) 1,5º a leste do norte; (c) 4,2 h; (d) 1,5º a oeste do sul 81. N; (c) não; (d) sim; (e) 8 N 2. *(ã* aponta para o centro da ajetória (a) (-32 h)i -

i; (-1,0 ***s2)i 29. (a) 66 N; (b) 2,3*** **s2 31. (a) 3,5 /s2; (b) 0,21**

CAPÍTULO 5

N 33. 9,9 s 35. 4,9 X 102 N 37. (a) 3,2 X 102 km/h; (b) 6,5 X 102

T 1. ***e, d*** **e** ***e*** **2. (a) e (b) 2 N, para a esquerda (a aceleração é zero km/h; (c) não 39. 2,3 41. 0,60 43. 21 m 45. (a) mais leve; (b) 778**

nas duas situações) 3. (a) igual; (b) maior (a aceleração é para cima N; (c) 223 N; (d) 1,11 kN 47. (a) 10 s; (b) 4,9 X 102 N; (c) 1,1 X

e, portanto, a força resultante é para cima) 4. (a) igual; (b) maior; 103 N 49. 1,37 X 103 N 51. 2,2 km 53. 12º 55. 2,6 X 103 N 57.

(c) menor 5. (a) aumenam; (b) sim; (c) permanecem os mesmos; 1,81 ***s 59. (a) 8,74 N; (b) 37,9 N; (c) 6,45*** **s; (d) na direção da (d) sim**

haste 61. (a)27 N; (b) 3,0 /s2 63. (b)240 N; (c) 0,60 65. (a) 69

P 1. (a) 2,3,4; (b) 1,3,4; (c) 1,+y; 2, +*x;* 3, quarto quadrante; 4, km/h; (b) 139 km/h; (c)sim 67. g(sen) - ***2°;,k*** **cos J) 69. 3,4** ***i***

terceiro quadrante 3. aumentar 5. (a) 2 e 4; (b) 2 e 4 7. (a) ***M;*** **(b) s2 71. (a) 35,3 N; (b) 39,7 N; (c) 320 N 73. (a) 7,5 /s2; (b) para**

M; **(c)** ***M;*** **(d) 2M; (e) 3M 9. (a) 20 kg; (b) 18 kg; (c) 10 kg; (d) to baixo; (c) 9,5 /s2; (d) para baixo 75. (a) 3,0 X 105 N; (b) 1,2º 77.**

das iguais; (e) 3,2,1 11. (a) aumenta a parir do valor inicial ***mg;*** **147** ***s 79. (a) 13 N; b)l,6*** **s2 81. (a) 275 N; (b) 877 N 83. (a) (b) diminui de** ***mg*** **até zero (e depois o bloco perde o contato com 84,2 N; b) 52,8 N; (c) 1,87 /s2 85. 3,4% 87. (a) 3,21 X 103N; (b) o piso)**

sim 89. (a) 222 N; (b) 334 N; (c) 311 N; (d) 311 N; (e) c, d 91. (a)

PR 1. 2,9 /s2 3. (a) 1,88 N; (b) 0,684 N; (c) (1,88 N)i + (0,684 ***Võl(4g*** **sen J); b) não 93. (a) 0,34; (b) 0,24 95. (a)** ***,-gl(sen)*** **-**

kJ; (c) 1,1 kJ; (d) 5,4 /s 19. 25 J 21 .(a) *-3Mgd/4;* (b) *Mgd;* (c) (c) não; (d) não 121. (a) 2,1 X 106 kg; (b) (100 + l,5t)º·5/s; (c)

Mgd/4; (d) *(gd/2)º·5* 23. 4,41 J 25. (a) 25,9 kJ; (b) 2,45 N 27. (a) (1,5 X 106)/(100 + 1,5t)º·5N; (d) 6,7 km 7,2 J; (b) 7,2 J; (c) O; (d) -25 J 29. (a) 0,90 J; (b) 2,1 J; (c) O 31.

(a) 6,6 /s; (b) 4,7 m 33. (a) 0,12 m; (b) 0,36 J; (c) -0,36 J; (d) CAPÍTULO 9

0,060 m; (e) 0,090 J 35. (a) O; (b) O 37. (a) 42 J; (b) 30 J; (c) 12 J; T 1. (a) na origem; (b) no quarto quadrante; (c) no eixo *y,* abaixo da (d) 6,5 /s, eixo +*x;* (e) 5,5 /s, eixo +*x;* (f) 3,5 /s, eixo + *x* 39. origem; (d) na origem; (e) no terceio quadrante; (f) na origem 2.

4,00 N/m 41. 5,3 X 102 J 43. (a) 0,83 J; (b) 2,5 J; (c) 4,2 J; (d) (a)-(c)no cenro de massa, ainda na origem (as forças são internas 5,0 W 45.4,9 X 102 W 47.(a) l,O X 102J; (b) 8,4W 49.7,4 X ao sistema e não podem deslocar o cenro de massa) 3. (Considere 102W 51. (a) 32,0 J; (b) 8,00 W; (c) 78,2º 53. (a) 1,20 J; (b) 1,10 as inclinações e a Equação 9-23). (a) 1,3 e depois 2 e 4 empatadas

/s 55. (a) 1,8 X 105 ft · lb; (b) 0,55 hp 57. (a) 797 N; (b) O; (c) (força nula); (b) 3 4. (a) mantém inalterado; (b) mantém inalterado

-1,55 kJ; (d) O; (e) 1,55 kJ; (f) Fvariadurante o deslocamento 59. (veja a Equação 9-32); (c) diminui (Equação 9-35) 5. (a) nula; (b) (a) 1 X 105 megatons de TNT; (b) 1 X 107 bombas 61. -6 J 63. posiiva (inicial para baixo, inal para cima); (c) +*y* 6. (Não há força (a) 314 J; (b)-155 J; (c) O; (d) 158 J 65. (a) 98 N; (b) 4,0 cm; (c) extena; Pé conservado.) (a) O; (b) não; (c) -*x* 7 .(a) 10 kg·/s; b) 3,9 J; (d) -3,9 J 67. (a) 23 mm; (b) 45 N 69. 165 kW 71. -37 J 14 kg·/s; (c) 6 kg·/s 8. (a) 4 kg·/s; (b) 8 kg·/s; (c) 3 J 9. (a) 73. (a) 13 J; (b) 13 J 75. 235 kW 77. (a) 6 J; (b) 6,0 J 79. (a) 2 kg·/s (conservação da componente *x* do momento) b) 3 kg·/s 0,6 J; (b) O; (c) -0,6 J

(conservação da componente *y* do momento)

CAPÍTULO B

P 1. (a) 2 N, para a direita; (b) 2 N, para a direita; (c) maior que 2

N, para a direita 3. b, c, a 5. (a) *x* sim, *y* não; (b) *x* sim, *y* não; (c) T 1. não (em duas rajetórias de a a b, o trabalho é-60 J; na ter *x* não, *y* sim 7. (a) *e,* a energia cinética não pode ser negativa; *d,*

ceira, é 60 J) 2. 3,1,2 (veja a Equação 8-6) 3. (a) todas iguais; a energia cinética total não pode aumentar; (b) *a;* (c) *b* 9. (a) um (b) todas iuais 4. (a) *CD,AB,BC* (O) (com base nas inclinações); estava em repouso; b) 2; (c) 5; (d) igual (como o choque de duas (b) o sentido positivo de *x* 5. são todas iguais

bolas de sinuca) 11. (a) *C;* (b) *B;* (c) 3

P 1. (a) 3,2,1; (b) 1,2,3 3. (a) 12 J; (b)-2 J 5. (a) aumenta; (b) PR 1. (a) -1,50 m; (b) -1,43 m 3. (a)-6,5 cm; (b) 8,3 cm; (c) 1,4

diminui; (c) diminui; (d) permanece constante em *AB* e *BC* e di cm 5. (a) -0,45 cm; (b) -2,0 cm 7. (a) O; (b) 3,13 X 10-11 m 9.

minui em *CD* 7. +30 J 9. 2,1,3

(a) 28 cm; (b) 2,3 /s 11. (-4,0

"

m)i + (4,0 m)] 13. 53 m 15. (a)

PR 1. 89 N/cm 3. (a) 167 J; (b) -167 J; (c) 196 J; (d) 29 J; (e) 167

"

A

A

(2,35i - 1,57 j) ***s2; (b) (2,35i - 1,57 j)t*** **s, com tem segundos;**

J; (f) -167 J; (g) 296 J; (h) 129 J 5. (a) 4,31 mJ; (b)-4,31 mJ; (d) retilínea, fazendo um ângulo de 34° para baixo 17. 4,2 m 19.

(c) 4,31 mJ; (d)-4,31 mJ; (e) todos aumentariam 7. (a) 13,1 J; (b) (a) 7,5 X 104 J; (b) 3,8 X 104 kg·/s; (c) 39º ao sul do leste 21.

-13,1 J; (c) 13,1 J; (d) todos aumentam 9. (a) 17,0 ***s; (b) 26,5 (a) 5,0 kg*****·s; (b) 10 kg/s 23. 1,0 X 103 a 1,2 X 103kg·/s 25.**

s; (c) 33,4 **s; (d) 56,7 m; (e) continuariam as mesmas 11. (a) (a) 42 N·s; (b) 2,1 kN 27. (a) 67 /s; (b)** ***-x;*** **(c) 1,2 kN; (d)** ***-x*** **2,08 /s; (b) 2,08 /s; (c) aumentaria 13. (a) 0,98 J; (b) -0,98 29. 5 N 31. (a) 2,39 X 103 N·s; (b) 4,78 X 105 N; (c) 1,76 X 103**

J; (c) 3,1 N/cm 15. (a) 2,6 X 102 m; (b) permanece o mesmo; (c) N·s; (d) 3,52 X 105 N 33. (a) 5,86 kg·/s; (b) 59,8º; (c) 2,93 kN; diminui 17. (a) 2,5 N; (b) 0,31 N; (c) 30 cm 19. (a) 784 N/m; (b) (d) 59,8º 35. 9,9 X 102N 37. (a) 9,0 kg·/s; (b)3,0 kN; (c)4,5 kN; 62,7 J; (c) 62,7 J; (d) 80,0 cm 21. (a) 8,35 ***s; (b) 4,33*** **s; (c) (d) 20** ***s 39. 3,0*** **s 41. (a) -(0,15 /s)i; (b) 0,18 m 43. 55**

7,45 /s; (d) diminuem 23. (a) 4,85 ***s; (b) 2,42*** **s 25. -3,2 X cm 45. (a) (l,OOi - 0,167]) km/s; (b) 3,23 MJ 47. (a)14 /s; b) 102 J 27. (a) não; (b) 9,3 X 102 N 29. (a) 35 cm; (b) 1,7 /s 31. 45º 49. 3,1 X 102/s 51. (a) 721** ***s; (b) 937*** **s 53. (a) 33%; (a) 39,2 J; (b) 39,2 J; (c)4,00 m 33. (a) 2,40** ***s; (b) 4,19*** **s 35. (b) 23%; (c) diminui 55. (a) +2,0 /s; (b) -1,3 J; (c) +40 J; (d) o (a) 39,6 cm; b) 3,4 cm 37. -18 mJ 39. (a) 2,1 /s; (b) 10 N; (c) sistema recebeu energia de alguma fonte, como, por exemplo, uma**

+x; **(d) 5,7 m; (e) 30 N; (f)** ***-x*** **41. (a)-3,7 J; (c) 1,3 m; (d) 9,1 m; pequena explosão 57. (a) 4,4 /s; (b) 0,80 59. 25 cm 61. (a) 99 g; (e) 2,2 J; (f) 4,0 m; (g) (4 -** ***x)e-x1*****4; (h) 4,0 m 43. (a) 5,6 J; (b) 3,5 (b) 1,9 /s; (c) 0,93** ***s 63. (a) 3,00*** **s; (b) 6,00 /s 65. (a) J 45. (a) 30,1 J; (b) 30,1 J; (c) 0,225 47. 0,53 J 49. (a) -2,9 kJ; 1,2 kg; b) 2,5 /s 67. -28 cm 69. (a) 0,21 kg; (b) 7,2 m 71. (a) (b) 3,9 X 102 J; (c) 2,1 X 102 N 51. (a) 1,5 MJ; (b) 0,51 MJ; (c) 1,0 4,15 X 105** ***s; (b) 4,84 X 105*** **s 73. 120º 75. (a) 433 /s; (b) MJ; (d) 63 /s 53.**

(a) 67 J; (b) 67 J; (c) 46 cm 55. (a)-0,90 J; (b) 250 /s 77. (a) 46 N; (b) nenhuma 79. (a) 1,57 X 106 N; (b) 1,35 X

0,46 J; (c) 1,0 /s 57. 1,2 m 59. (a) 19,4 m; (b) 19,0 /s 61. (a) 105 kg; (c) 2,08 m/s 81. (a) 7290 /s; b) 8200 /s; (c) 1,271 X

1,5 X 10·2N; (b) (3,8 X 102)g 63. (a) 7,4 /s; (b) 90 cm; (c) 2,8 m; 101º J; (d) 1,275 X 101º J 83. (a) 1,92 m; (b) 0,640 m 85. (a) 1,78

(d)15 m 65. 20 cm 67. (a) 7,0 J; (b) 22 J 69. 3,7 J 71. 4,33 /s *s; (b) menor; (c) menor; (d) maior 87. (a) 3,7* s; (b) 1,3 N·s; 73. 25 J 75. (a) 4,9 /s; (b)4,5 N; (c) 71 º; (d) permanece a mesma (c) 1,8 X 102 N 89. (a) (7,4 X 103 N·s)i - (7,4 X 103 N·s)]; (b) 77. (a) 4,8 N; (b) +*x;* (c) 1,5 m; (d) 13,5 m; (e) 3,5 /s 79. (a) 24 (-7,4 X 103N·s)i; (c) 2,3 X 103N; (d) 2,1 X 104N; (e) -45º 91.

kJ; (b) 4,7 X 102 N 81. (a) 5,00 J; (b) 9,00 J; (c) 11,0 J; (d) 3,00 +4,4 *s 93. 1,18 X 104 kg 95. (a) 1,9* s; (b) -30º; (c) elásti

J; (e) 12,0 J; () 2,00 J; (g) 13,0 J; (h) 1,00 J; (i) 13,0 J; (j) 1,00 J; ca 97. (a) 6,9 *s; (b) 30º; (c) 6,9* s; (d) -30º; (e) 2,0 /s; () (1) 11,0 J; (m) 10,8 m; (n) volta para *x* = O e para. 83. (a) 6,0 kJ; -180º 99. (a) 25 mm; (b) 26 mm; (c) para baixo; (d) 1,6 X 10- 2

(b) 6,0 x 102w; (c) 3,0 x 102w; (d) 9,0 x 102w 85. 880 MW /s2 101. 29 J 103. 2,2 kg 105. 5,0 kg 17. (a) 50 kg/s; (b) 1,6 X

87. (a) v0 = (2gL)º·5; (b) *5mg;* (c)-mgL; (d) *-2mgL* 89. (a) 109 J; 102 kg/s 109. (a) 4,6 X 103 km; (b) 73% 111. 190 /s 113. 28,8

(b) 60,3 J; (c) 68,2 J; (d) 41,0 J 91. (a) 2,7 J; (b) 1,8 J; (c) 0,39 m N 115. (a) 0,745 mm; (b)153º; (c) 1,67 mJ 117. (a) (2,67 /s)i +

93. (a) 10 m; (b) 49 N; (c) 4,1 m; (d) 1,2 X 102 N 95. (a) 5,5 *s; (-3,00* s)]; (b) 4,01 /s; (c) 48,4º 119. (a) -0,50 m; (b) -1,8

(b)5,4 m; (c) permanecem as mesmas 97. 80 mJ 99. 24 W 101. cm; (c) 0,50 m 121. 0,22%

-12 J 103. (a) 8,8 /s; (b) 2,6 kJ; (c) 1,6 kW 105. (a) 7,4 X 102

J; (b) 2,4 X 102 J 17. 15 J 109. (a) 2,35 X 103 J; (b) 352 J 111.
CAPÍTULO 10

738 m 113. (a) -3,8 kJ; (b) 31 kN 115. (a) 300 J; (b) 93,8 J; (c) T 1. b e c 2. (a) e (d) *(a = d2J/dt2* deve ser consante) 3. (a) sim; 6,38 m 117. (a) 5,6 J; (b) 12 J; (c) 13 J 119. (a) 1,2 J; (b) 11 /s; (b) não; (c) sim; (d) sim 4. são todos iguais 5. 1, 2, 4, 3 (veja a

Equação 10-36) 6. (veja a Equação 10-40) 1 e 3 empaados, 4, e anel (ordem inversa de [) *1.* (a) diminui; (b) permanece o mesmo depois 2 e 5 empaados (zero) 7. (a) para baixo na igura (Tre, = O); (r. = O e, portanto, *L* é conservado); (c) aumenta (b) menor (considere os braços de alavanca)

P 1. *a,* depois *b* e *e* empatados, depois *e,* depois *d* (zero) 3. (a) ica P 1. (a) e, *a* e depois *b* e *d* empatados; (b) *b,* depois *a* e *e* empata girando no mesmo lugar; (b) rola na sua direção;(c)rola para longe dos, depois *d* 3. todas iuais 5. (a) diminuir; (b) horário; (c) anti de você 5. (a) 1, 2, 3 (zero); (b) 1 e 2 empatados, depois 3; (c) 1

horário 7. maior 9. *c,a,b*

e 3 empatados, depois 2 7. (a) permanece o mesmo; (b) aumena;

PR 1. 14 rev 3. (a) 4,0 rad/s; (b) 11,9 rad/s 5. 11 radls 7. (a) 4,0 (c) diminui; (d) permanece o mesmo, diminui, aumenta 9 *.D, B* e m/s; (b) não 9. (a) 3,00 s; (b) 18,9 rad 11. (a) 30 s; (b) 1,8 X 103 rad depois *A* e *C* empatados 13. (a) 3,4 X 102s; b) -4,5 X 10-3rad/s2; (c) 98 s 15. 8,0 s 17. (a) PR 1. (a) O; b) (22 m/s)i; (c) (-22 m/s)i; (d) O; (e) 1,5 X 103 m/s2; 44rad; (b)5,5 s; (c)32s;(d) -2,ls;(e)40s 19.(a) 2,50 X 103 rad/s; () 1,5 X 103m/s2; (g) (22 m/s)i; (h) (44 m/s)i; (i) O; U) O; (k)l,5 X

(b) 20,2 m/s2; (c)O 21. 6,9 X 10-13 rad/s 23. (a) 20,9 rad/s; (b) 12,5 103 m/s2; (1) 1,5 X 103 *s2 3. -3,15 J 5. 0,020 7. (a) 63 rad*s; *ls;* (c) 800 revlmin2; (d) 600 rev 25. (a) 7,3 X 1 0 -5 rad/s; (b) 3,5 X (b) 4,0 m *9.* 4,8 m 11. (a) (-4,0N)i; (b) 0,60 kg·m2 13. 0,50 15.

102 m/s; (c) 7,3 X 10-5 rad/s; (d) 4,6 X 102 *s 27. (a) 73 c*s2; (a) -(O, 11 m)w; (b) -2,1 m/s2; (c) -47 rad/s2; (d) 1,2 s; (e) 8,6 m; (b) 0,075; (c) 0,11 29. (a) 3,8 X 103 rad/s; (b) 1,9 X 102/s 31. () 6,1 *s 17. (a) 13 cm*s2; (b) 4,4 s; (c) *55* c/s; (d) 18 mJ; (e) (a) 40 s; (b) 2,0 rad/s2 33. 12,3 kg·m2 35. (a) 1,1 kJ; (b) 9,7 kJ 37. 1,4 J; () 27 revis 19. (-2,0 N·m)i 21. (a) (6,0 N·m)J + (8,0 N·m) 0,097 kg·m2 39. (a) 49 J; (b) 1,0 X 102 min 41. (a) 0,023 kg·m2;

k; (b) (-22 N·m)i 23. (a) (-1,5 N·m)i -(4,0 N·m)] - (1,0 N·m) (b) 1,1 mJ 43. 4,7 X 10-• kg·m2 45. -3,85 N·m 47. 4,6 N·m 49. k; (b) (-1,5 N·m)i - (4,0 N·m)} -(1,0 N·m)k 25. (a) (50 N·m)k; (a) 28,2 rad/s2; (b) 338 N·m 51. (a) 6,00 c/s2; (b) 4,87 N; (c) 4,54 (b) 90º 27. (a) O; (b) (8,0 N·m)i + (8,0 N·m)k 29. (a) 9,8 kg·m2ls; N; (d) 1,20 rad/s2; (e) 0,0138 kg·m2 53. 0,140 N 55. 2,51 X 10-• (b) +z 31. (a) O; (b) -22,6 kg·m2ls; (c)-7,84 N·m; (d) -7,84 N·m kg·m2 57. (a) 4,2 X 102rad/s2; (b) 5,0 X 102 rad/s 59. 396 N·m 61. 33. (a) (-1,7 X 102 kg·m2/s)k; (b) (+56 N·m)k; (c) (+56 kg·m2ls2) (a) -19,8 kJ; (b) 1,32 kW 63. 5,42 m/s 65. (a) 5,32 /s2; (b) 8,43 k 35. (a) 48tk N·m; (b) aumentando 37. (a) 4,6 X 10-3kg·m2; (b) m/s2; (c) 41,8º 67. 9,82rad/s 69. 6,16 X 10-5kg·m2 71. (a) 31,4 1,1 X 10-3kg·m21s; (c) 3,9 X 10-3kg·m2ls 39. (a) 1,47 N·m; (b)20,4

rad/s2; b) 0,754 m/s2; (c) 56,1 N; (d) 55,1 N 73. (a) 4,81 X 105 N; rad; (c) -29,9 J; (d) 19,9 W 41. (a) 1,6 kg·m2; (b) 4,0 kg·m2/s 43.

(b) 1,12 X 104N·m; (c) 1,25 X *1061* 75. (a) 2,3 rad/s2; (b) l,4rad/s2 (a) 1,5 m; (b) 0,93 rad/s; (c) 98 J; (d) 8,4 rad/s; (e) 8,8 X 102 J; () 77. (a) -67 revlmin2; (b) 8,3 rev 81. 3,1 rad/s 83. (a) 1,57 *s2; (b) da energia interna das patinadoras 45. (a) 3,6 revis; b) 3,0; (c) a 4,55 N; (c) 4,94 N 85. 30 rev 87. 0,054 kg·m2 89. 1,4 X 102N·m força que o homem exerce sobre os tijolos converte energia intena 91. (a) 10 J; (b) 0,27 m 93. 4,6 radls2 95. 2,6 J 97. (a) 5,92 X 104 do homem em energia cinética 47. 0,17 rad*s 49. (a) 750 revlmin; m/s2; (b) 4,39 X 104 s-2 99. (a) 0,791 kg·m2; (b) 1,79 X 10-2N·m (b) 450 revlmin; (c) horário 51. (a) 267 revlmin; b) 0,667 53. 1,3

101. (a) 1,5 X 102 cm/s; (b) 15 rad/s; (c) 15 rad/s; (d) 75 cm/s; (e) X 103 *s 55. 3,4 radls 57. (a) 18 rad*s; (b) 0,92 59. 11,0 /s 61.

3,0 rad/s 103. (a) 7,0 kg·m2; (b) 7,2 m/s; (c) 71 º

1,5 radls 63. 0,070 rad/s 65. (a) 0,148 rad/s; (b) 0,0123; (c) 181º

67. (a) 0,180 m; (b) horário 69. 0,041 rad/s 71. (a) 1,6 m/s2

CAPULO 1 1

; (b) 16

rad/s2; (c) (4,0 N)i 73. (a) O; (b) O; (c)-30t3k kg·m2ls; (d) ***-90t2***

T 1. (a) iual; (b) menor 2. menor (considere a ransferência de k N·m; (e) 30t3k kg·m2ls; () ***90t2*** **k N·m 75. (a) 149 kg·m2; (b) 158**

energia, de energia cinética de rotação para energia potencial gravi kg·m2ls; (c) 0,744 rad/s 77. (a) 6,65 X 10-5kgm2ls; (b) não; (c) O; tacional) 3. (desenhe os vetores e use a rera da mão direita) (a) ***z;*** **(d) sim 79. (a) 0,333; (b) 0,111 81. (a) 58,8 J; (b) 39,2 J 83. (a) 61,7**

(b) ±y; (c) - ***x*** **4. (veja a Equação 1 1 -21) (a) 1 e 2 empatados, 2 e 4 J; (b) 3,43 m; (c) não 85. (a)** ***mvRl(l + MR2);*** **(b)** ***mvR21(/ +MR2)***

empatados e depois ***5*** **(zero); (b) 2 e 3 5. (veja as Equações 11-23 87. a velocidade de rotação icaria menor; o dia icaria cerca de 0,8 s e 11-16) (a) 3, 1; depois 2 e 4 empatados (zero); (b) 3 6. (a) todos mais longo 89. (a) 12,7 rad/s; (b) horário 91. (a) 0,81 mJ; b) 0,29; iguais (mesmo r,nesno te, portanto, mesmo U); (b) esfera, disco, (c) 1,3 X 10-2N 93. (a)** ***R212;*** **(b) um cilindro circular**

ÍNDICE

A

estáico, 124

E

Aceleração, 19

Colisão(ões)

"Efeito chicote", 28

angular, 320

de uma bola com um taco, 217

Eixo(s)

constante, 256

elásica, 224

de rotação, 249

pedra de amolar com, 256

em dois pêndulos, 230

fixo,249

rotor com, 257

em uma dimensão, 227

paralelos, teorema dos, 263

bidimensional de um coelho, 66

em duas dimensões, 230

Elementos

centrípeta, 73

em série, 219

propriedades dos, 330-332

constante, 22, 25

enre um carro de corrida e um muro de

tabela periódica dos, 333

equações de movimento com, 24

proteção, 220

Empuxo, 232

para baixo, 69

inelástica(s)

de um foguete, 233

de um foguete, 233

em uma dimensão, 224

Eneria

em queda livre, 26

representação esquemática de uma, 224

cinéica, 146

instantânea, 19, 65

perfeitamente inelásticas unidimensionais, 225

de rotação, 261

linear constante, 255

sunples, 217

teste explosivo, 266

média, 19, 65

traseiras, 28

de um praticante de *bungee jump*, 172

nula, 69

Componente(s)

em um choque de locomotivas, 146

positiva, 21

escalares, 46

conservação de, 189

vertical, 100

radial, 267

lei de, 145

Acelerômetro, 20

soma de vetores a partir das, 46

mecânica

Aderência, 123

tangencial, 259,267

conservação da, 179

Alcance horizontal, 70

vetoriais, 46

em um toboágua, 181

Aluno que gira, 302

Comprimento(s), 3,319

o que é?, 145

Alvo

aproximados, 4

potencial, 172

em movimento, 229

Condutividade térmica, 320

cálculo da, 176

estacionário, 227

Coniguração de referência, 177

curva de uma, interpretação, 182

pesado, 228

Conservação do momento

elástica, 173, 177

Ampere, 319

angular

gráico de uma, interpretação, 185

Ângulo(s)

barata sobre um disco, 305

gravitacional, 172, 177

de um vetor, medida dos, 45

rotação de uma roda e de um banco 304

'

de uma preguiça, escolha o nível de

entre dois vetores usando produto escalar, 51

linear, lei de, 221

referência para a, 178

plano, 320

Constante

térmica, variação da, 188

sólido,320

de Avogadro, 321

elétrica, 321

Equilíbio, 96

Avogadro, constante de, 321

fundamentais da ísica, 321

estável, 184

gravitacional, 321

instável, 184

manéica, 321

B

neutro, 184

universal dos gases, 321

ponto de, 184

Balança

Conversão(ões)

Escalares, 40

de braços iguais, 100

e,n cadeia, 3

Estado relaxado, 154

de mola, 100

fatores de, 3, 323-326

Expansão(ões)

Barra de mero padrão, 3

Corpo(s)

exponencil, 327

Báskara, fórmula de, 327

livre, diagrama de, 96

Jogarínica, 327

Bohr

maciços, 209

rigonométricas, 328

magnéton de, 321

ríido, 249

Explosão

raio de, 321

reta de referência do, 251

bidimensional e momento, 223

Bola que dese uma rampa, 291

Corrente elérica, 319

unidimensional e velcidade relativa, 222

Boltzmann, constante de, 321

'

energia

Cataglyphis ortis, 47

D

cinética e rabalho, 145

Cenro de massa, 207

Dados astronômicos, 322

potencial e conservação da

de três partículas, 212

Decomposição do vetor, 42

eneria, 172

movimento do, 215

Densidade de fluxo magnético, 320

força e movimento, 91, 121

de uma placa vazada, 210

Derivadas, 329

medição, 1

velocidade do, 225

Desaceleração, 20

movimento

Cinemática, 13

Deslizamento, 123

em duas e rês dimensões, 61

Coeiciente(s)

Deslocamento, 13, 14, 61, 62, 63

reilíneo, 13

de arrasto, 126

angular, 250, 255

rolamento, torque e momento angular, 286

de arito

Direção radial, 73

rotação, 249

cinético, 124

Distância perpendicular, 258

vetores, 40

1-338

ÍNDICE

Fluxo magnéico, 320

luminosa, 319

de translação e rotação, correspondências

Força(s), 92

radiante, 320

entre, 272,301

alinhadas, 97

Ioiõ, 292

de um coelho, 62

centrípeta, 129

de uma montanha-russa, 260

com um ângulo variável, 107

J

do centro de massa de três partículas, 215

conservativas, 173, 174

em duas e três dimenses, 61-90

constante, 148

Joule, 145, 320

estado do, 146

independência da trajetória para o rabalho

força e, 91-119, 121-144

de, 174

L

horizontal, 68, 69

de arrasto, 126

Lance livre, 61

integração de gráicos em análise de, 27

de atrito, 121

Lei(s)

linear, 249

cinético, 122, 123

da conservação do momento

relativo

estáico, 123

da física, vetores e, 49

bidimensional: aviões, 77

de tração, 101

de conservação

em duas dimensões, 77

dissipativas, 173, 174

angular, 302

em uma dimensão, 75

do rolamento, 289

de um tnomento

unidimensional, 76

elástica, 154

angular, 302

retilneo, 13-39

em um elevador, 107

linear, 221

roda de bicicleta em, fotoraia, 287

extena, 96, 190

de Hooke, 154

unidimensional, 13

gravitacional, 99

de Newton

verical, 68, 70

trabalho realizado pela, 151

aplicando as, 103

Muliplicação de vetor(es), 49

inclinada, 125

primeira, 91

por um

intena, 96

segunda, 95

escalar, 49

movimento e, 91-120, 121-144

para rotações, 268

vetor, 50

não alinhadas, 98

terceira, 102

Múon, massa do, 321

normal, 100

Lesões de pescoço causadas pelo

princípio de superposição para, 92

"efeito chicote", 28

N

restauradora, 154

Linha de ação, 268

resultante, 92

Liquefação, 7

Neton

total, 92

primeira lei de, 91, 92

***Loop* vertical, 130**

variável, 148, 154

segunda lei de, 95

unidimensional, 157

terceira lei de, 102

M

Formiga do deserto, 47

Fórmula(s)

Magnéton

o

de Báskara, 327

de Bohr, 321

Origem, 13

1nateáticas, 327-329

nuclear, 321

Fotografia esroboscópica de uma bola de tênis

Massa(s), 6, 94, 319

p

quicando, 67

aproximada, 7

Frquência, 320

atômica, unidade, 7

Padrão(ões), 1

Função(ões)

cenro de, 207

fundamentais, l

trigonométricas, 45

de eléron, 321

scundários, 3

do ângulo *e*, 327

de tnúon,321

Par de forças da tereira lei de Newton, 102

de próton, 321

Partícula, 13

em 1novimento, 15

Medição, 1-12

Pilotos de caça fazendo curvas, 7 4

em repouso, 15

Mero, 319

Pitágoras, teorema de, 327

***Grndjeté*, 214**

Módulo, 14

Planck, constante de, 321

Grandeza(s)

Mo!, 319

Planetas, algumas propriedades dos, 322

angulares são vetores?, 254

Mo,nento

Plano de simetria, 209

de escalares, 40

angular, 294

Ponto(s)

escalar, 50

conservação do, 302

de quilíbrio, 184

fundamenais, 1

de um corpo ríido girando em tomo de

de referência, 177

medindo, 1

um eixo xo, 300

de retomo, 182, 184

ordem de, estimativa de, 4

de um sistema de duas parículas, 296, 299

de simeria, 209

vetorial, 14, 40

definição, 296

zero, 13

Graus, 45

conservação do, 226

Posição(es), 13

de inércia, 261

angular, 250

H

alguns, 263

ero, 250

Henry, 320

cálculo do, 262

de ovo, 127

Hooke, lei de, 154

de uma barra homogênea, 265

variação de, 40

eneria cinéica em colisões e, 224

vetor, 61

linear, 216

Potência

1

conservação de, 221

instantânea, 161, 191

Idenidades trigonométricas, 327

de um sistema de partículas, 217

média, 160, 191

Impulso, 217,218

manético

Precessão

bidimensional, 220

do elétron, 321

de um giroscópio, 306

Inclinação, 15

do próton, 321

velocidade de, 307

Indutânia, 320

Movimento(s)

Preixos das unidades do SI, 2

Inércia, momento de, 249

angular, 249

Primeira lei de Newton, 91, 92

Integral(is), 329

balístico, 67

Princípio(s)

definida, 25

análise do, 69

da conservação da energia mcânica, 179

Intensidade

de um projétil, 68

para superposição para a força, 92

de campo magnético, 320

circular uniforme, 73, 129

Problemas, táicas para solução de, 45

ÍNDICE

Produto

de ensaio de rotação, 266

Tração, 101

de vetores, 328

de massa variável: um foguete, 231

Trajetória

escalar, 50

aceleração, cálculo da, 231

da cabeça, 214

ângulo entre dois vetores usando, 51

velocidade, cálculo da, 232

de duas bolas de beisebol, 70

vetorial, 50, 51, 53

de partículas, 207

de uma bola, levando em conta a resistência

usando vetores unitários, 54

momento linear de um, 217

do ar, 70

Projéil, 67

segunda lei de Newton para, 212

do centro de massa, 214

lançado de u1n avião, 71

Intenacional de Unidades, 2, 15, 319-320

em queda livre, 26

pesado, 229

unidades

equação da, 70

fundamentais, 319

equivalentes para calcular o trabalho, 176

Q

scundárias, 320

parabólica, 70, 207

Transferências intenas de energia, 190

Queda

suplementares, 320

Triângulos, 327

de um pinguim, torque, derivada do momento

não inercial, 93

Tempo, 5, 319

Regra(s)

intervalos de, aproximados, 5

V

da mão direita, 52, 53, 254

Teorema

de Cner, 328

binomial, 327

Variáveis lineares e angulares

Resistência elétrica, 320

de Pitágoras, 327

movimento de u1na montanha-russa, 260

Reta de referência, 250

do rabalho e energia cinéica com uma força

relaçes entre, 258

Velocidade

do corpo rígi

variável, 158

do, 251

Rolamento

dos eixos paralelos, 263

angular

como uma

Terceira lei de Newton, 102

a partir da

combinação de ranslação e rotação, 286

par de forças da, 102

aceleração angular, 254

posição angular, 252

rotação pura, 288

Terra, distâncias da, algumas, 322

corpos em, 307

Tesla, 320

escalar, 251

energia cinética de, 288

Teste do percurso fechado, 174

média, 251

bidimensional de um coelho, 65

forças do, 289

Tiro de canhão contra um navio pirata, 72

da luz no vácuo, 321

para baixo em u1na rampa, 289

Torgue, 249, 267

Rotação, 249-285

deinição de, 293

escalar

instantânea, 17, 18

com aceleração angular constante, 255

exercido por uma força de uma partícula, 294

média, 14, 16

eixo de, 249

revisão do, 292

***Tour jeté*,**

instantânea, 17, 63

energia cinéica de, 261

303

segunda lei de Newton para, 268, 297

Trabalho, 14 7

média, 14, 15, 63

de um caro velho, 16

senido de, 254

de forças conservaivas, independência da

terminal(is), 126

trabalho e energia cinéica de, 270

trajetória para, 174

variáveis da, 249

eneria cinética e, 14 7

de uma gota de chuva, 128

no ar, 127

Rotor com aceleração angular constante, 257

expressão para o, 147

Vetor(es), 40-60

Rydberg, constante de, 321

integração bidimensional, 160

por interação ráfica, cálculo, 159

componentes de, 43

s

realizado por

determinação dos, 44

dus forças constantes, 150

decomposição de, 43

Salto

levantar e baixar um objeto, 152

escalares e, 40

de trampolim, 303

pela força gravitacional, 15 l

leis da ísica e, 49

em distância, 303

um elevador acelerado, 153

multiplicação de, 49

Segunda lei de Neton, 95

uma força

por um

para rotaçes, 268, 297

aplicada, 156

escalar, 49

para um sistema de parículas, 212

constante, 15 l

vetor, 50

Sentido

elástica, 154

posição, 61

de rotação, 254

externa sobre um sistema, 186

bidimensional, 62

negaivo, 14

variável genérica, 157

resultante, 41

positivo, 14

uma mola para mudar a energia

soma geométrica de, 41

SI. *Veja* Sistema Intenacional de Unidades

cinética, 15 6

uniários, 45

Símbolos matemáticos, 327

sinal do, 148

soma de vetores usando, 47

Sinal(is)

teorema do, 149

Volt, 320

do trabalho, 148

total, 149

Volume, 320

matemáticos, 327

trajetórias equivalentes para calcular o, 176

Sistema(s)

unidade de, 149

w

de coordenadas dextrogiro, 46

variação da eneria potencial e, 173

Watt, 161, 320